

Advanced Engineering Research

Теоретический и научно-практический журнал

Том 22 № 3 2022 | Vol. 22 no. 3 2022

ISSN 2687-1653

1 Механика
Mechanics

2 Машиностроение и машиноведение
Machine Building and Machine Science

3 Информатика, вычислительная техника и управление
Information Technology, Computer Science, and Management

DOI 10.23947/2687-1653

vestnik-donstu.ru

Advanced Engineering Research

Т. 22, № 3, 2022

Теоретический
и научно-практический журнал

Издаётся с 1999 г.

Выходит 4 раза в год
июль-сентябрь 2022 г.

ISSN 2687-1653 (online)
DOI: 10.23947/2687-1653

Учредитель и издатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)

Название журнала (до августа 2020): Вестник Донского государственного технического университета

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

01.02.01 – Теоретическая механика (технические науки)
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела (технические науки)
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела (физико-математические науки)
01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры (технические науки)
05.02.02 – Машиноведение системы приводов и детали машин (технические науки)
05.02.04 – Трение и износ в машинах (технические науки)
05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
05.02.08 – Технология машиностроения (технические науки)
05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)
05.02.11 – Методы контроля и диагностика в машиностроении (технические науки)
05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)
05.13.17 – Теоретические основы информатики (технические науки)
05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ (технические науки)

Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ), в международной базе EBSCO (Academic Search Ultimate Magazines and Journal), Dimensions, CyberLeninka, ROAD, GoogleScholar.

Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ), Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 78854 от 07 августа 2020 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Над номером работали:

И. В. Бойко, М. П. Смирнова (англ. версия)

Адрес учредителя, издателя и редакции:

344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-372
E-mail: vestnik@donstu.ru http://vestnik-donstu.ru/



СОДЕРЖАНИЕ

МЕХАНИКА

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

МЕХАНИКА
MECHANICS







УДК 539.374

https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-180-192

Научная статья



Выбор и идентификация модели упруговязкопластичности наполненного фторкомпозита по данным испытаний на свободное и стесненное сжатие

Д. С. Петухов ✉, **А. А. Адамов** , **И. Э. Келлер**

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Российская Федерация, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1

✉ petuhovds@mail.ru

Аннотация

Введение. Наполненные композиты на основе политетрафторэтилена обладают свойствами, позволяющими работать при высоких контактных давлениях, возвратно-поступательном характере сдвиговых нагрузок и в широком диапазоне температур. Благодаря этому их применяют в качестве антифрикционных слоев опорных частей с шаровым сегментом. Для моделирования механического поведения таких материалов в условиях эксплуатации нужны адекватные определяющие уравнения упруговязкопластичности и методы их идентификации по данным базовых экспериментов.

Материалы и методы. Тензорно-линейную модель упруговязкопластичности предлагается идентифицировать по данным экспериментов на свободное сжатие образцов. Их подвергают нагружению до максимальной деформации 10 %, выдерживают, разгружают и проводят аналогичный цикл нагружения до 160 МПа при стесненном сжатии. Эксперимент с композитом на основе политетрафторэтилена, наполненного 40 масс. % мелкодисперсной бронзы, проходил при комнатной температуре. Испытания на стесненное сжатие выполнялись для двух, на свободное сжатие — для трех значений скорости деформации в диапазоне $10^{-6}-10^{-3}$ с$^{-1}$. Для описания рассматривались две модели упруговязкопластичности, представляющие собой модификации моделей Свейна и Клечковски и соответствующие соединению вязкоупругого либо упругого нелинейновязкого элемента с пластическим или эндохронным элементом. В качестве вязкоупругого элемента рассматривался интегральный оператор с ядром Кольрауша.

Результаты исследования. Итоги испытаний по стесненному сжатию позволили отделить от определяющих соотношений упругую связь объемных деформаций и средних напряжений. Данные циклов свободного сжатия при различных скоростях деформации использовали для определения материальных констант модели. С этой целью реализован эффективный поисковый алгоритм на основе симплекс-метода минимизации невязки. Обе модели обнаружили важность пластической составляющей (не зависящей от скорости деформации) для качественного описания циклического изменения напряжений, сопровождающего циклическое изменение деформаций, а также их зависимость от скорости деформаций.

Обсуждение и заключения. Обе модели упруговязкопластичности корректно описывают поведение исследованного фторкомпозита в условиях нагружения, близких к условиям эксплуатации антифрикционных слоев опорных частей с шаровым сегментом, и могут рассматриваться в качестве основы для их дальнейшего обобщения с учетом зависимости от температуры.

Ключевые слова: упруговязкопластичность, определяющие уравнения, фторкомпозиты, идентификация, свободное и стесненное сжатие, трапецеидальное нагружение.

Благодарности. Авторы признательны ведущему научному сотруднику НИИ механики МГУ А. В. Хохлову за плодотворное обсуждение работы.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20–48–596012.

Для цитирования. Петухов, Д. С. Выбор и идентификация модели упруговязкопластичности наполненного фторкомпозита по данным испытаний на свободное и стесненное сжатие / Д. С. Петухов, А. А. Адамов, И. Э. Келлер // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 3. — С. 180–192. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-180-192

Original article

Selection and Identification of a Model of Elasto-Viscoplasticity of the Filled Fluorocomposite according to Free and Constrained Compression Tests

Dmitriy S. Petukhov ✉, **Anatoliy A. Adamov**, **Ilya E. Keller**

Institute of Continuous Media Mechanics UrB RAS, 1, Academika Koroleva St., Perm, Russian Federation

✉ petuhovds@mail.ru

Abstract

Introduction. Properties of filled composites based on polytetrafluoroethylene allow them to work at high contact pressures, reciprocating nature of shear loads, and in a wide temperature range. Due to this, they are used as antifriction layers of bearing parts with ball segment. To simulate the mechanical behavior of such materials under operating conditions, adequate constitutive equations of elasto-viscoplasticity and methods of their identification according to the data of basic experiments are needed.

Materials and Methods. The tensor-linear model of elasto-viscoplasticity should be identified according to the data of tests on free compression of samples. They were subjected to loading up to a maximum deformation of 10 %, allowed to remain, unloaded, and then, a similar loading cycle up to 160 MPa under constrained compression was carried out. The experiment with a composite based on polytetrafluoroethylene filled with 40 wt. % fine bronze, was conducted at room temperature. Tests for constrained compression were performed for two values of the strain rate, and for free compression — for three values of the strain rate in the range of $10^{-6}-10^{-3}\,s^{-1}$. For the description, two models of elasto-viscoplasticity were considered, representing modifications of Swain and Kletschkowski's models and corresponding to the connection of a viscoelastic or elastic nonlinear viscous element with a plastic or endochronic element. An integral operator with a Kohlrausch kernel was considered as a viscoelastic element.

Results. The results of the constrained compression tests made it possible to separate the elastic relationship of volumetric deformations and average stresses from the constitutive relations. The data of free compression cycles at different strain rates were used to determine the material constants of the model. For this purpose, an efficient search algorithm based on the simplex method of minimizing the discrepancy was implemented. Both models discovered the importance of the plastic component (independent of the deformation rate) for a qualitative description of the stress cycling that accompanied the cyclic deformation, as well as their dependence on the strain rate.

Discussion and Conclusions. Both models of elasto-viscoplasticity described correctly the behavior of the studied fluorocomposite under loading conditions close to the operating conditions of the antifriction layers of the bearing parts with ball segment. They can be considered as a basis for their further generalization, taking into account the dependence on temperature.

Keywords: elasto-viscoplasticity, constitutive equations, filled fluorocomposite, identification, free and constrained compression, trapezoidal loading.

Acknowledgments. The authors are grateful to A. V. Khokhlov, leading researcher of Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, for a fruitful discussion of the work.

Funding information. The research is done with the financial support from RFFI and Perm Krai within the frame of research project no. 20–48–596012.

For citation. D. S. Petukhov, A. A. Adamov, I. E. Keller. Selection and Identification of a Model of Elasto-Viscoplasticity of the Filled Fluorocomposite according to Free and Constrained Compression Tests. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 180–192. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-180-192

Введение. Наполненные композиты на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) обладают свойствами, позволяющими работать в широком диапазоне температур при высоких контактных давлениях и возвратно-поступательном скольжении по контртелу. Благодаря этому названные материалы применяют в качестве антифрикционных слоев опорных частей с шаровым сегментом для мостов[1, 2]. ПТФЭ как основа для антифрикционных полимерных композитов в широком диапазоне температур демонстрирует высокую стабильность свойств и исключительно низкие коэффициенты трения, скольжения и покоя. Введение наполнителей помогает без значительного увеличения коэффициентов трения существенно повысить износостойкость, жесткость и предел текучести, а также снизить ползучесть композита. Реологические свойства антифрикционного материала должны обеспечивать работоспособность в процессе эксплуатации изделия в диапазоне температур от менее –50 до +50 °C:

– при расчетных значениях сжимающей нагрузки не менее 60 МПа;

– при ее пиковых значениях до 150 МПа;

– при нормированном размахе циклических сдвиговых деформаций.

Имеет значение также предсказуемость изменения свойств и толщины антифрикционного слоя при его монтаже в шарнир.

При эксплуатации рассматриваемых материалов приходится оценивать работоспособность антифрикционных слоев опорных частей с шаровым сегментом, прогнозировать ресурс на весь срок службы (до 50 лет). Для этого необходимо строить и идентифицировать по данным базовых экспериментов адекватные определяющие уравнения упруговязкопластичности. Модели, описывающие реологическое поведение наполненных фторкомпозитов, также важны для расчетов эксплуатационных свойств уплотнений валов и штоков в мощных дизельных агрегатах[3]. Для расчета поведения изделий под нагрузкой при монтаже (на коротких отрезках времени) важно корректное описание моделями пластических (упругопластических, вязкопластических) свойств материала. Для расчета поведения изделий в процессе эксплуатации (на длинных отрезках времени) необходимо адекватное представление явлений релаксации, ползучести и циклической ползучести (рэтчетинга).

В литературе редко встречаются реологические модели наполненных фторкомпозитов, описывающие циклы нагрузки, выдержки и разгрузки в широких диапазонах времени и скоростей деформаций. Можно указать лишь работу [1], удовлетворяющую всем этим требованиям. В ней предложена модель, соответствующая параллельному соединению эндохронного и нелинейно-вязкого элементов. Данной моделью описаны все испытания[4] одноосным растяжением при комнатной температуре. Речь идет о:

– кривых нагружениях до деформации 0,08 со скоростями деформации $10^{-4} - 10^{-2}$ с$^{-1}$;

– кривых релаксациях в течение 10 ч при постоянной деформации 0,03–0,08;

– петлях гистерезиса в цикле нагрузки до деформации 0,1, кратковременной выдержки и разгрузки с последующей выдержкой.

Записаны одномерные определяющие уравнения, содержащие семь материальных констант, а также их тензорное обобщение для геометрически линейного случая. Авторы указывают, что эндохронная модель пластичности позволяет описать непрерывное изменение пластической деформации при нагружении и разгрузке. Это характерно для полимерных материалов и нехарактерно для металлов. Отметим, что в [1] не использовался параметр эндохронности, позволяющий регулировать характерный диапазон перехода в пластическое состояние. К тому же в работе[5] описаны аналогичные кривые для температуры до 120 °C и скоростей деформаций в диапазоне $10^{-4} - 10^{0}$ с$^{-1}$, кривые релаксации с резким повышением температуры до 100 °C и кривые релаксации при одноосном сжатии.

---

[1] EAD 050009-00-0301 Spherical and cylindrical bearing with special sliding material made of fluoropolymer / EOTA // Product regulation : [сайт]. URL: https://www.nlfnorm.cz/en/ehn/6189

[2] Stanton J. F., Roeder C. W., Campbell T. I. Appendix C: Friction and Wear of PTFE Sliding Surfaces // NCHRP Report 432: High-Load Multi-Rotational Bridge Bearings. Washington : TRB, 1999. 413 p.

[3] Material and Computational Analysis of PTFE Seals / H. Sui [et al.] // SAE Paper Series : [сайт]. 1995, 951055. URL: https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/951055/?src=2001-01-1118

[4] То же.

[5] То же.

В [2] представлена тензорная геометрически нелинейная модель. Она описывает поведение наполненных фторкомпозитов при различных монотонных и циклических историях нагружения в различных напряженных состояниях и при произвольных температурах. Учитывается вязкопластический реологический элемент в последовательном соединении с вязкоупругим. Эта модель в целом удовлетворительно описывает кривые, соответствующие экспериментам [1], но она существенно сложнее и требует 14 материальных констант. В [3] для описания циклов микроиндентирования наполненного фторкомпозита используется модель [4]. Ее реологическая структурная схема схожа с [2], но учитывает спектр времен релаксации вязкоупругого элемента.

Модель [5] предназначена для описания особенностей упругопластического поведения твердых полимеров при циклическом одноосном нагружении. Эволюционные уравнения для ее внутренней переменной, напряжений и пластических деформаций имеют нелинейные перекрестные связи, поэтому модель не соответствует какой-либо реологической структурной схеме. Используется мера внутреннего времени, характерная для эндохронной теории пластичности. Для идентификации модели требуется 21 константа.

Нелинейная одномерная модель вязкоупругопластичности типа Максвелла [6–9] содержит всего две материальные функции. Она описывает неполное восстановление деформаций в цикле нагрузки-разгрузки и циклическую ползучесть (рэтчетинг) при несимметричных циклах нагружения. Для моделей нелинейной вязкоупругости с операторами дробного интегродифференцирования характерна гибкость при малом числе материальных констант и функций [7]. Необходимо исследовать применимость подобных нелинейных моделей для описания поведения полимерных материалов в цикле нагружения и разгрузки с выдержками [10–13]. Работы [14, 15] посвящены идентификации линейных моделей вязкоупругости по результатам испытаний индентированием. В [16, 17] для этой цели используются результаты динамического механического анализа, однако существенная нелинейность исследуемых в настоящей работе материалов не позволяет воспользоваться данной методикой. В [18, 19] экспериментально исследуется рэтчетинг ПТФЭ композитов, но отсутствует математическое описание результатов.

В [8] представлена методика идентификации модели изотропного упругопластического поведения наполненных композитов на основе ПТФЭ и сверхвысокомолекулярного полиэтилена на основе экспериментальных данных по свободному и стесненному сжатию. Благодаря особенности реологии пластмасс [9] к ним применимы методы [10]. Такой подход позволяет определить:

– функцию упругой объемной сжимаемости;

– функцию упрочнения для сдвиговых упругопластических свойств в рамках теории пластического течения.

Итак, условия эксплуатации рассматриваемых изделий, механические свойства полимерных материалов и представленный анализ литературы служат основой для дальнейших изысканий. Выделим базовое испытание на свободное сжатие цилиндрических образцов 20×20 мм. Оно состоит из циклов нагрузки до деформации 0,1, кратковременной выдержки 15 мин. и разгрузки с последующей выдержкой 15 мин. Так можно определить данные для описания упругой, пластической и вязкой составляющих деформации, релаксации и обратной ползучести с остаточными деформациями. Аналогичное определение твердости предусмотрено стандартом[6]. Нагружение выполняется при трех скоростях деформации в диапазоне $10^{-6} - 10^{-3}$ с$^{-1}$. Кроме того, образцы испытывают на стесненное сжатие до напряжения 160 МПа при двух скоростях деформации из этого же диапазона. Все испытания повторяются для значений из диапазона температур эксплуатации полимерного материала. Этих данных должно быть достаточно для идентификации подходящей модели упруговязкопластического сжимаемого материала с нелинейно-упругой сжимаемостью.

Интересуют, в первую очередь, возможности описания экспериментальных данных при комнатной температуре простейшими моделями упруговязкопластичности типа предложенных в [1] и [4], которые отличаются структурными схемами.

Материалы и методы. В качестве моделируемого материала выбрали композит на основе ПТФЭ ПН90, наполненного 40 масс. % мелкодисперсной бронзы. Цилиндрические образцы диаметром и высотой по 20 мм

[6] ГОСТ 4670-2015 (ISO 2039-1:2001). Пластмассы. Определение твердости. Метод вдавливания шарика / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. М.: Стандартинформ, 2016. 10 с.

изготавливались прессованием и спеканием смеси порошков[3]. Для выбора и последующей идентификации модели провели эксперименты:

– на стесненное сжатие с единственной ненулевой компонентой тензора деформации;

– на свободное сжатие с единственной ненулевой компонентой тензора напряжений.

В первом случае трение по боковой границе исключалось смазкой, во втором — тонкой пленкой из ПТФЭ и смазкой.

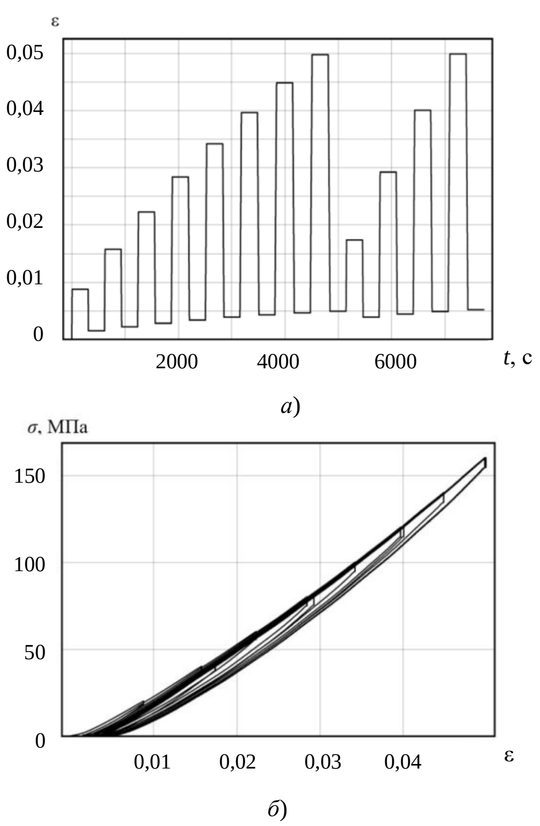


Рис. 1. Испытание на циклическое стесненное сжатие: *а* — программа; *б* — кривая гистерезиса

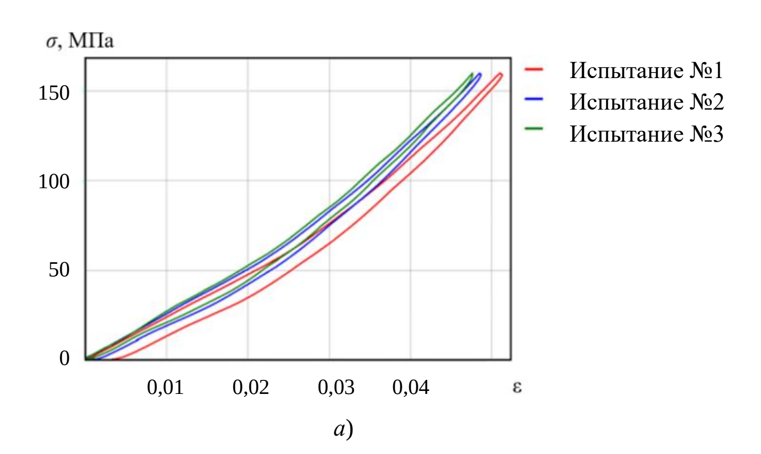
Цель экспериментов — выявление необратимых объемных деформаций и объемно-упругих свойств материала. Первым испытанием было циклическое стесненное сжатие с увеличивающейся амплитудой (рис. 1 *а*). В нем задавалась величина скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 2,5\times10^{-3}$ с$^{-1}$ и паузы между разгрузками и нагрузками по 300 с. За несколько первых циклов накапливается остаточная объемная деформация, равная приблизительно 5×10^{-3} (рис. 1). Она слабо меняется при выдержке образца в разгруженном состоянии.

Далее провели испытания сжатием до 160 МПа со значительно более медленной скоростью деформации $\dot{\varepsilon} = 2,5\times10^{-5}$ с$^{-1}$ и последующей разгрузкой (рис. 2 *а*):

– недеформированного образца (1);

– того же образца повторно (2);

– образца после циклического испытания, приведенного на рис. 1 (3).



а)

б)

Рис. 2. Медленные испытания на стеснённое сжатие:
а — диаграммы нагружения; *б* — начальные и конечные участки диаграмм

Испытания одного и того же образца проводились через сутки.

Как видно на рис. 2 *б*, в опыте с новым образцом наблюдается максимальная остаточная деформация около $3{,}5\times10^{-3}$. При повторном испытании она составила 1×10^{-3}. В третьем испытании не наблюдается остаточной деформации. Свойства материала при циклическом стесненном сжатии сопровождаются переходным необратимым процессом и стабилизируются за несколько циклов.

Объемные свойства определялись из третьего испытания (рис. 2 *а*), в котором отсутствуют остаточные деформации. В настоящей работе объемные деформации полагаются нелинейно упругими. Данные описываются квадратичной зависимостью:

$$\sigma = M(\varepsilon)\varepsilon; \quad M(\varepsilon) = a_0 + a_1\varepsilon; \quad a_0 = 2{,}4\ \text{ГПа}; \quad a_1 = 22{,}1\ \text{ГПа}. \tag{1}$$

Здесь σ, ε — осевые компоненты тензоров напряжений Коши и логарифмических деформаций; M — модуль стесненного сжатия, который связан с модулем объемного сжатия K соотношением:

$$M(\varepsilon_v) = 3\frac{K(\varepsilon_v)\left(3K(\varepsilon_v) + E_\infty\right)}{9K(\varepsilon_v) - E_\infty}, \tag{2}$$

где E_∞ — равновесный модуль Юнга (не зависит от объемной деформации); $\varepsilon_v = \varepsilon_{ii}$, ε_{ij} — компоненты тензора логарифмических деформаций.

Значение $E_\infty = 690$ МПа получили с наклоном кривой $\sigma(\varepsilon)$ при одноосном сжатии в окрестности $\sigma = 1$ МПа и релаксации 8,65 %.

Используя (1), (2) и поправку 9,38 % на податливость машины в испытании на стесненное сжатие, можно получить искомую зависимость $K(\varepsilon_v)$, которая слабо (максимум на 0,03 %) отличается от линейной:

$$\sigma_m = K(\varepsilon_v)\varepsilon_v; \quad K(\varepsilon_v) = b_0 + b_1\varepsilon_v; \quad b_0 = 2{,}1\ \text{ГПа}; \quad b_1 = 22{,}2\ \text{ГПа}, \tag{3}$$

где $\sigma_m = \frac{1}{3}\sigma_{ii}$, σ_{ij} — компоненты тензора напряжений Коши.

Эксперименты для определения связи между средним напряжением и объемной деформацией проводятся на образцах, предварительно испытанных стесненным сжатием с необратимой объемной деформацией. То же касается и экспериментов на свободное сжатие, описанных ниже и необходимых для определения связи девиаторных частей тензоров напряжений и деформаций. В результате модель отражает свойства уплотненного материала. На производстве процессы, связанные с необратимой объемной деформацией, происходят во время опрессовки слоя антифрикционного полимерного материала при сборке конструкции опорной части и не влияют на дальнейшее поведение материала.

Испытания на одноосное сжатие проводили для определения соотношений между девиаторными частями тензоров напряжений и деформаций. На рис. 3 приводятся результаты опытов для трех значений скоростей деформаций $\dot{\varepsilon} = 4{,}63\times10^{-6}\ \text{с}^{-1}$, $2{,}35\times10^{-5}\ \text{с}^{-1}$, $2{,}27\times10^{-3}\ \text{с}^{-1}$. Далее данные этих экспериментов будут интерпретироваться в рамках одномерной модели. При формулировке трехмерной модели из этих соотношений может быть исключена упругая объемная часть.

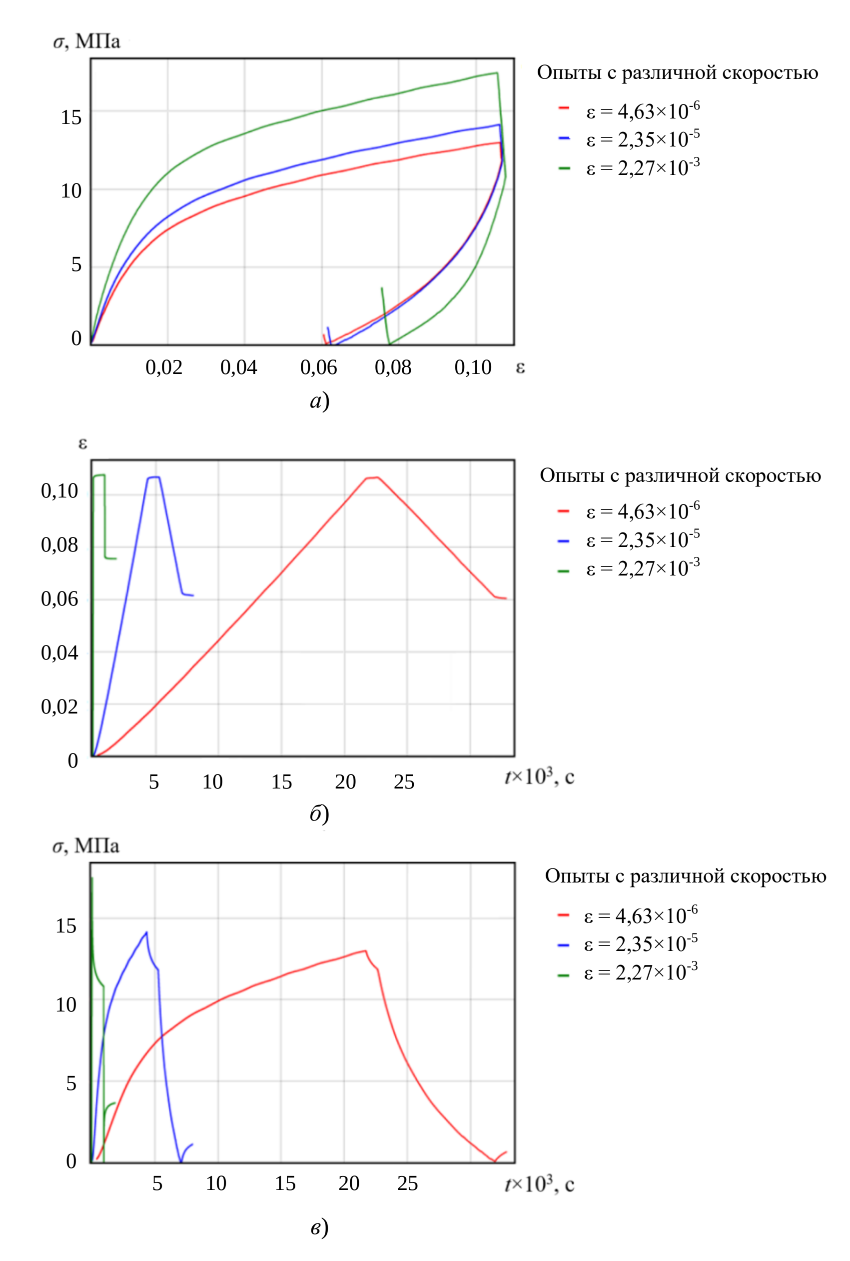


Рис. 3. Эксперимент на одноосное сжатие с тремя различными скоростями: *а* — диаграммы нагружения; *б* — истории деформаций; *в* — истории напряжений

При выборе подходящей модели оказалось, что экспериментальные данные, изображенные на рис. 3 не описываются соотношениями линейной вязкоупругой среды:

$$\sigma(\mathrm{t}) = \int_0^{\mathrm{t}} \mathrm{R}(\mathrm{t}-\tau)\dot{\varepsilon}(\tau)\mathrm{d}\tau = \mathrm{R}_0\left(\varepsilon(\mathrm{t}) - \int_0^{\mathrm{t}} \Gamma(\mathrm{t}-\tau)\varepsilon(\tau)\mathrm{d}\tau\right), \tag{4}$$

где $\sigma(\mathrm{t}), \varepsilon(\mathrm{t})$ — истории напряжений и деформаций, применяемые для описания эластомеров и полимеров [10].

Были попытки использовать выражения для функций релаксации $\mathrm{R}(\mathrm{t})$ либо скорости релаксации $\Gamma(\mathrm{t})$ с различным числом параметров: сумма экспонент, дробно-экспоненциальная функция Работнова[7], ядро Колтунова[8], ядро из работы Т. Л. Смита[9], ядро Кольрауша [10]:

[7] Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.

[8] Колтунов М. А. Сингулярные функции влияния в анализе релаксационных процессов // Прочность и пластичность. М.: Наука. 1971. С. 640–645.

[9] Смит Т. Л. Эмпирические уравнения для вязкоупругих характеристик и вычисления релаксационных спектров // Вязкоупругая релаксация в полимерах. М.: Мир, 1974. С. 44–56.

$$R(t)=R_\infty+\sum_{i=1}^{4}R_i\exp(-\alpha_i t);\;\; \varGamma(t)=At^{\alpha-1}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-\beta)^n t^{n\alpha}}{\Gamma\left(\alpha(n+1)\right)};\;\; \varGamma(t)=\frac{A\exp(-\beta t^m)}{t^{1-\alpha}};$$
$$R(t)=R_\infty+\frac{R_0-R_\infty}{1+(t/\tau_0)^\alpha};\;\; R(t)=R_\infty+\left(R_0-R_\infty\right)\exp\left(-(t/\tau_0)^\alpha\right). \tag{5}$$

Здесь R_∞, R_0, R_i, α, β, τ_0 — материальные константы; Γ — гамма-функция, а также монотонная аппроксимация кубическими сплайнами по восьми точкам, координаты которых служили параметрами.

Рассматривались модели, в которых кроме вязких учитываются пластические необратимые деформации. Исследовались две базовые модели такого типа.

Базовая модель 1 (рис. 4 *а*) представляет собой соединение моделей [4] и [10] и предполагает последовательное соединение трех элементов.

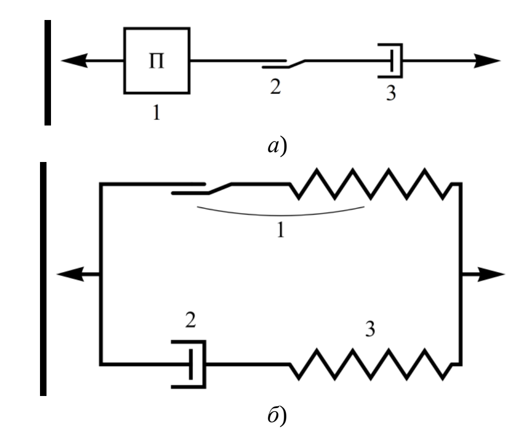


Рис. 4. Структурные схемы базовых моделей: *а* — модель 1; *б* — модель 2

1. Линейный вязкоупругий элемент с ядром Кольрауша [10]:

$$\varepsilon_1(t)=\int_0^t \varPi(t-\tau)\dot{\sigma}(\tau)d\tau,\qquad \varPi(t)=\frac{1}{R_\infty}+\left(\frac{1}{R}-\frac{1}{R_\infty}\right)\exp\left(-\left(\frac{t}{\tau_0}\right)^\alpha\right), \tag{6}$$

где R, R_∞, τ_0, α — материальные константы, первые две имеют физический смысл мгновенного и равновесного модулей.

2. Пластический элемент с линейным упрочнением:

$$\dot{\varepsilon}_2(t)=\begin{cases}k\dot{\sigma}(t), & \sigma\ge\sigma_u\vee\sigma\le-\sigma_u\\ 0, & -\sigma_u\le\sigma\le\sigma_u\end{cases}, \tag{7}$$

где σ_u, k — материальные константы.

3. Линейно-вязкий элемент:

$$\dot{\varepsilon}_3(t)=\eta^{-1}\sigma(t), \tag{8}$$

где η — материальная константа.

Итоговое выражение для деформаций:

$$\varepsilon(t)=\varepsilon_1(t)+\varepsilon_2(t)+\varepsilon_3(t). \tag{9}$$

Модель (6)–(9) решается относительно деформаций, поэтому для ее идентификации удобно располагать историями напряжений $\sigma(t)$ (рис. 3 *в*).

Структурная схема базовой модели 2 (рис. 4 *б*), заимствованной из [1], представляет собой параллельное соединение двух элементов.

1. Эндохронный пластический элемент с нелинейной упругой частью:

$$\dot{\varepsilon}_p(t)=\frac{\sigma_1(t)}{Y}\left|\dot{\varepsilon}(t)\right|;\; \sigma_1(t)=A\,\mathrm{sign}\left(\varepsilon(t)-\varepsilon_p(t)\right)\ln\left(1+B\left|\varepsilon(t)-\varepsilon_p(t)\right|\right), \tag{10}$$

где ε_p — внутренний параметр, имеющий смысл необратимой деформации элемента; Y, A, B — материальные константы.

2. Пара последовательно соединенных нелинейно-вязкого (2) и линейно-упругого (3) элементов:

$$\dot{\varepsilon}_2(t) = \frac{1}{\eta}\mathrm{sign}\left(\sigma_2(t)\right)\left|\mathrm{sh}\left(\frac{\sigma_2(t)}{\sigma_0}\right)\right|^k, \tag{11}$$

$$\sigma_3(t) = \sigma_2(t) = c\varepsilon_3(t), \tag{12}$$

где sign — знак аргумента; η, σ_0, k, c — материальные константы.

Результирующее выражение для напряжений:

$$\sigma(t) = \sigma_1(t) + \sigma_2(t). \tag{13}$$

Модель (10)–(13) решается относительно напряжений, поэтому для ее идентификации удобно располагать историями деформаций $\varepsilon(t)$ (рис. 3 *в*). Выражение $\sigma_1(t)$ в (13) вычисляется как решение системы алгебродифференциальных уравнений (10), а $\sigma_2(t)$ — как решение системы (11), (12) с учетом $\varepsilon(t) = \varepsilon_2(t) + \varepsilon_3(t)$.

Результаты исследования. Минимизация невязки между экспериментальными историями деформаций (рис. 3 *б*) и предсказаниями модели позволила найти семь материальных констант базовой модели 1:

$$R = 895\ \text{МПа};\ R_\infty = 205\ \text{МПа};\ \tau_0 = 1{,}66 \times 10^3\ \text{с};\ \alpha = 0{,}64;$$
$$\sigma_u = 10{,}2\ \text{МПа};\ k = 0{,}0095\ \text{МПа}^{-1};\ \eta = 9{,}28 \times 10^6\ \text{с}. \tag{14}$$

В качестве поисковой процедуры использован симплекс-метод. Сравнение расчетных и экспериментальных данных приводится на рис. 5.

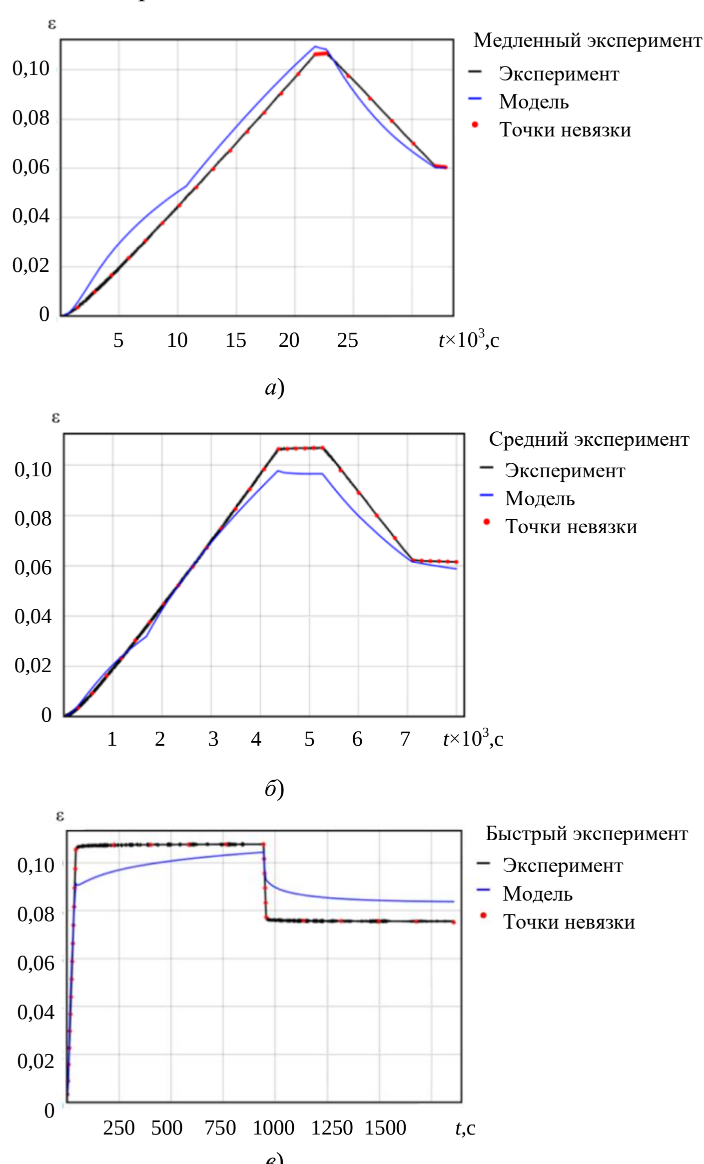


Рис. 5. Сравнение экспериментальных данных и предсказаний базовой модели 1:
а — $\dot{\varepsilon} = 4{,}63 \times 10^{-6}\ \text{с}^{-1}$; *б* — $\dot{\varepsilon} = 2{,}35 \times 10^{-5}\ \text{с}^{-1}$; *в* — $\dot{\varepsilon} = 2{,}27 \times 10^{-3}\ \text{с}^{-1}$

Минимизация невязки между экспериментальными историями напряжений (рис. 3 *в*) и предсказаниями модели позволила обнаружить семь материальных констант базовой модели 2:

$$\begin{gathered} \mathrm{Y} = 20{,}3\,\text{МПа};\ \mathrm{A} = 6{,}01\,\text{МПа};\ \mathrm{B} = 61{,}8; \\ \eta = 6{,}81\cdot 10^{6}\ \text{с};\ \sigma_0 = 0{,}66\,\text{МПа};\ \mathrm{k} = 1{,}08;\ \mathrm{c} = 681\,\text{МПа}. \end{gathered} \tag{15}$$

При этом считались заданными истории деформаций (рис. 3 *б*). Сравнение расчетных и экспериментальных данных приведено на рис. 6.

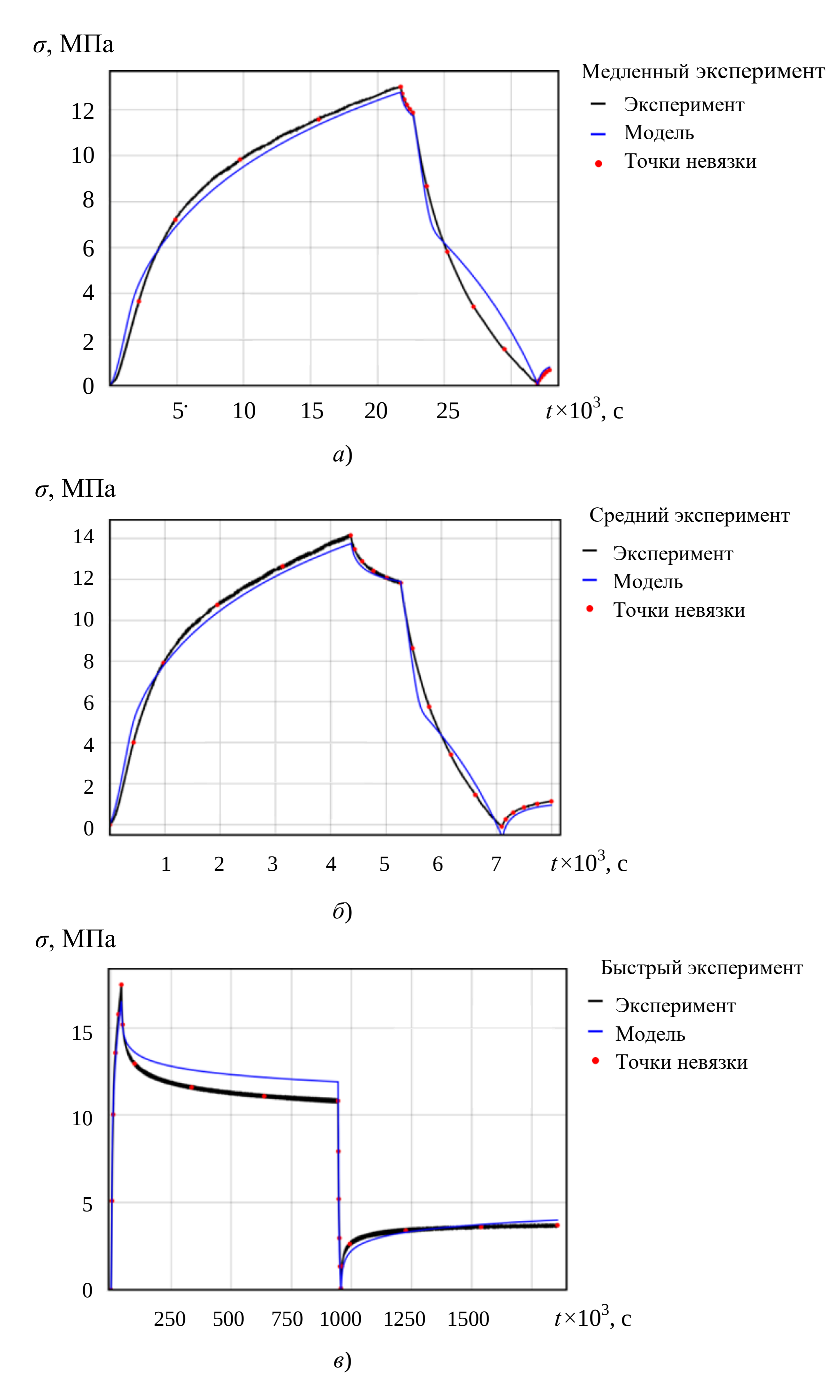


Рис. 6. Сравнение экспериментальных данных и предсказаний базовой модели 2:
а — $\dot{\varepsilon} = 4{,}63\times10^{-6}\ \text{с}^{-1}$; *б* — $\dot{\varepsilon} = 2{,}35\times10^{-5}\ \text{с}^{-1}$; *в* — $\dot{\varepsilon} = 2{,}27\times10^{-3}\ \text{с}^{-1}$

Обсуждение и заключения. Рассмотренные одномерные модели обобщаются на пространственную формулировку, которая предполагает изотропию свойств и неизменность главных осей тензора деформаций в процессе нагружения. Для этого тензоры напряжений Коши и логарифмических деформаций разлагаются на шаровую и девиаторную части:

$$\sigma = \sigma_m \mathrm{I} + \mathrm{s},\ \ \varepsilon = \frac{1}{3}\varepsilon_v \mathrm{I} + \mathrm{e}.$$

Связь между шаровыми частями σ_m и ε_v задается выражением (3). Связь между девиаторными частями *s* и *e* задается соотношениями, обобщающими (6)–(9) или (10)–(13) в зависимости от выбора базовой модели. Эти выражения следует переписать в терминах историй девиаторных частей *s(t)* и *e(t)*, исключая из одноосного сжатия шаровую часть.

В качестве пространственного обобщения соотношений (7) для пластического элемента модели 1 рассматривается закон пластического течения, ассоциированный с критерием текучести Мизеса, с изотропным линейным деформационным упрочнением. Связь девиаторов будет выглядеть так:

$$e(t) = e_1(t) + e_2(t) + e_3(t);$$

$$e_1(t) = \int_0^t \Pi(t-\tau)\dot{s}(\tau)d\tau; \quad \Pi(t) = \frac{1}{R_\infty} + \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_\infty}\right)\exp\left(-\left(t/\tau_0\right)^\alpha\right);$$

$$e_2 = \frac{9}{4}k^3\frac{s:\dot{s}}{(e_2)^2}s; \quad e_2(t) = \int_0^t \dot{e}_2(\tau)d\tau; \quad \dot{e}_2 = \sqrt{\tfrac{2}{3}\dot{e}_2:\dot{e}_2};$$

$$e_3(t) = \eta^{-1}s(t),$$

где двоеточие означает операцию свертки тензоров $A:B = A_{ij}B_{ij}$, заданных компонентами в ортонормированном базисе.

Соотношения эндохронной теории пластичности (10) модели 2 также обобщаются в духе пластичности Мизеса, что приводит к следующей записи для девиаторов:

$$s = s_1 + s_2; \; e = e_2 + e_3;$$

$$\dot{e}_p = \frac{3}{2}\dot{\varepsilon}\frac{s_1}{Y}; \quad \dot{\varepsilon} = \sqrt{\tfrac{2}{3}\dot{e}:\dot{e}}; \quad s_1 = \mathrm{dev}\left(\sum_{i=1}^{3}\xi_i n_i n_i\right); \quad \xi_i = A\,\mathrm{sign}(\lambda_i)\ln\left(1 + B|\lambda_i|\right);$$

$$\dot{e}_2 = \frac{3}{2}\frac{1}{\eta}\left|\mathrm{sh}\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0}\right)\right|^k\frac{s_2}{\sigma_2}; \quad \sigma_2 = \sqrt{\tfrac{3}{2}s_2:s_2};$$

$$e_3 = c^{-1}s_2,$$

где dev означает девиатор тензора; λ_i, n_i — собственные числа и собственные векторы тензора $e - e_p = \lambda_i\, n_i\, n_i$.

Следует заметить, что авторы [1] использовали вариант модели с параметром эндохронности [14], равным единице. Представляется целесообразным рассмотрение этого параметра в качестве материальной константы, поскольку известно его влияние на описание переходных процессов после смен режимов нагружения.

В рамках настоящей работы проводились опыты по стесненному и свободному сжатию композита на основе политетрафторэтилена, наполненного мелкодисперсной бронзой с массовой долей 40 %. При этом выполнялись нагрузки, разгрузки и выдержки с различными скоростями деформаций в диапазоне $10^{-6} - 10^{-3}\,c^{-1}$. Эксперименты на стесненное сжатие проводились при давлениях, соответствующих пиковым нагрузкам антифрикционного слоя в шарнирах со сферическим сегментом. Обнаружена неспособность стандартной линейной вязкоупругой модели описывать данные испытаний для нескольких скоростей деформации. Выбраны и идентифицированы две семиконстантные модели с пластическими и нелинейными вязкими структурными элементами, которые могут описать данные базовых экспериментов. Модель с эндохронным элементом показала большую аккуратность описания данных при высокой скорости деформирования. Модель с пластическим элементом может быть усовершенствована, если учесть нелинейность в вязком элементе и нелинейное деформационное упрочнение, что потребует увеличения числа материальных констант. Данные моделей обобщены на пространственный случай для изотропного материала и историй деформирования с постоянной ориентацией трехгранника главных осей.

Список литературы

1. Kletschkowski, T. Endochronic Viscoplastic Material Models for Filled PTFE / T. Kletschkowski, U. Schomburg, A. Bertram // Mechanics of Materials. — 2002. — Vol. 34. — P. 795–808. https://doi.org/10.1016/S0167-6636(02)00197-7

2. Bergström, J. S. A Constitutive Model for Predicting the Large Deformation Thermomechanical Behavior of Fluoropolymers / J. S. Bergström, L. B. Hilbert Jr. // Mechanics of Materials. — 2005. — Vol. 37. — P. 899–913. https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2004.09.002

3. Stan, F. Viscoelastic Characterization of Polytetrafluoroethylene (PTFE) Polymer by Sharp Indentation / F. Stan, A. V. Munteanu, C. Fetecau / AIP Conference Proceedings. — 2011. — Vol. 1315. — P. 221–226. https://doi.org/10.1063/1.3552445

4. Stan, F. Study of Stress Relaxation in Polytetrafluoroethylene Composites by Cylindrical Macroindentation / F. Stan, C. Fetecau // Composites Part B: Engineering. — 2013. — Vol. 47. — P. 298–307. 10.1016/j.compositesb.2012.11.008

5. Menčik, J. Determination of Viscoelastic-Plastic Material Parameters of Biomaterials by Instrumental Indentation / J. Menčik, Li Hong He, M. V. Swain // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. — 2009. — Vol. 2. — P. 318–325. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2008.09.002

6. Drozdov, A. D. Cyclic Elastoplasticity of Solid Polymers / A. D. Drozdov, J. de C. Christiansen // Computational Materials Science. — 2008. — Vol. 42. — P. 27–35. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2007.06.002

7. Хохлов, А. В. Сравнительный анализ свойств кривых ползучести, порождаемых линейной и нелинейной теориями наследственности при ступенчатых нагружениях / А. В. Хохлов // Математическая физика и компьютерное моделирование. — 2018. — Т. 21, № 2. — С. 27–51. https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2018.2.3

8. Хохлов, А. В. Индикаторы применимости и методики идентификации нелинейной модели типа Максвелла для реономных материалов по кривым ползучести при ступенчатых нагружениях / А. В. Хохлов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Естественные науки. — 2018. — № 6 (81). — С. 92–112. http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2018-6-92-112

9. Хохлов, А. В. Методики идентификации нелинейной модели типа Максвелла для реономных материалов по кривым обратной ползучести / А. В. Хохлов // Проблемы прочности и пластичности. — 2018. — Т. 80, № 2. — С. 238–254. https://doi.org/10.32326/1814-9146-2018-80-2-238-254

10. Огородников, Е. Н. Математические модели нелинейной вязкоупругости с операторами дробного интегродифференцирования / Е. Н. Огородников, В. П. Радченко, Л. Г. Унгарова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2018. — № 2. — С. 147–161. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2018.2.13

11. Адамов, А. А. Экспериментальное обеспечение и идентификация модели изотропного тела с упругой объемной сжимаемостью дисперсно-наполненных композитов на основе фторопласта и сверхвысокомолекулярного полиэтилена / А. А. Адамов // Конструкции из композиционных материалов. — 2013. — № 2 (130). — С. 28–37.

12. Гольдман, А. Я. Объемное деформирование пластмасс / А. Я. Гольдман. — Ленинград: Машиностроение, 1984. — 232 с.

13. Адамов, А. А. Методы прикладной вязкоупругости / А. А. Адамов, В. П. Матвеенко, Н. А. Труфанов, И. Н. Шардаков. — Екатеринбург : УрО РАН, 2003. — 411 с.

14. Flat-Punch Indentation of Viscoelastic Material / L. Cheng, X. Xia, W. Yu [et al.] // Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics. — 2000. — Vol. 38. — P. 10–22. 10.1002/(SICI)1099-0488(20000101)38:1<10::AID-POLB2>3.0.CO;2-6

15. Measurement of Creep Compliance of Solid Polymers by Nanoindentation / H. Lu, B. Wang, J. Ma [et al.] // Mechanics of Time-Dependent Materials. — 2003. — Vol. 7. — P. 189–207. https://doi.org/10.1023/B:MTDM.0000007217.07156.9b

16. Tóth, L. F. Thermal, Viscoelastic, Mechanical and Wear Behaviour of Nanoparticle Filled Polytetrafluoroethylene: A Comparison / L. F. Tóth, P. De Baets, G. Szebényi // Polymers. — 2020. — Vol. 12. — P. 1940. https://doi.org/10.3390/polym12091940

17. Гавриленко, С. Л. Аттестация линейной вязкоупругой модели антифрикционного полимерного композита по результатам ускоренных испытаний на релаксацию / С. Л. Гавриленко, С. В. Шилько // Теоретическая и прикладная механика. — 2017. — № 32. — С. 155–158.

18. Конова, Е. М. Влияние природы наполнителя на физико-механические свойства радиационных модификаций композитов на основе политетрафторэтилена / Е. М. Конова, С. Г. Острер, С. А. Хатипов // Пластические массы. — 2011. — № 5. — С. 40–43.

19. Wenjuan Xu. Tensile Ratcheting Behaviors of Bronze Powder Filled Polytetrafluoroethylene / Wenjuan Xu, Hong Gao, LiLan Gao [et al.] // Frontiers of Chemical Science and Engineering. — 2013. — Vol. 7. — P. 103–109. https://doi.org/10.1007/s11705-013-1315-8

20. Kadashevich, Yu. Endochronic Model of Plasticity Generalizing Sanders's Theory / Yu. Kadashevich, S. Pomytkin // Scientific Letters of Rzeszow University of Technology. Mechanics. — 2014. — Vol. 31. — P. 539–547. https://doi.org/10.7862/RM.2014.57

Поступила в редакцию 08.08.2022
Поступила после рецензирования 29.08.2022
Принята к публикации 31.08.2022

Об авторах:

Петухов Дмитрий Сергеевич, ведущий инженер «Лаборатории нелинейной механики деформируемого твердого тела» Института механики сплошных сред УрО РАН (614018, РФ, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1), ResearcherID, ScopusID, ORCID, petuhovds@mail.ru

Адамов Анатолий Арсангалеевич, ведущий научный сотрудник «Лаборатории нелинейной механики деформируемого твердого тела» Института механики сплошных сред УрО РАН (614018, РФ, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1), доктор физико-математических наук, ScopusID, ORCID, adamov@icmm.ru

Келлер Илья Эрнстович, заведующий «Лаборатории нелинейной механики деформируемого твердого тела» Института механики сплошных сред УрО РАН (614018, РФ, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1), доктор физико-математических наук, ResearcherID, ScopusID, ORCID, kie@icmm.ru

Заявленный вклад соавторов:

Д. С. Петухов — модификация моделей и идентификация их материальных констант по данным эксперимента. А. А. Адамов — разработка методики и проведение экспериментов. И. Э. Келлер — обзор литературы и выбор моделей.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МЕХАНИКА
MECHANICS







УДК 629.7.017.1
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-193-203

Научная статья





Методика определения вероятности повреждения беспилотных летательных аппаратов в результате воздействия атмосферных факторов внешней среды

Д. Г. Белоножко[1] ✉, **И. Д. Королев**[1], **Ю. О. Чернышев**[2], **Н. Н. Венцов**[2]
[1] Краснодарское высшее военное училище им. генерала армии С. М. Штеменко, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Грибоедова, 18
[2] Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ staeer@rambler.ru

Аннотация
Введение. Для эффективного применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) необходимо учитывать воздействия атмосферных факторов внешней среды. На основе существующего уровня развития научно-методического аппарата невозможно определить вероятность повреждения БЛА в условиях комплексного воздействия атмосферных факторов внешней среды и оценить целесообразность дальнейшего выполнения полётного задания. Нарушение процесса функционирования БЛА обусловлено воздействием атмосферных осадков, ветровых и температурных условий среды. Целью работы является разработка методики определения вероятности повреждения БЛА в результате воздействия атмосферных факторов среды, а также оценка быстродействия работы программного комплекса, реализующего разработанный алгоритм при использовании треугольных, трапециевидных, пятиугольных и Гауссовых функций принадлежности.
Материалы и методы. Предложена методика, позволяющая с использованием теории нечеткой логики определить вероятность повреждения БЛА при неточностях и неопределённостях описания атмосферных воздействий внешней среды. Она учитывает возможные атмосферные факторы и позволяет определить вероятность повреждения БЛА при различных воздействиях. Вычислительная сложность алгоритма, реализующего методику, существенно зависит от количества качественных оценок атмосферных воздействий на БЛА.
Результаты исследования. Предложена и протестирована методика определения вероятности повреждения БЛА в результате воздействия атмосферных факторов среды на базе нечетких множеств (треугольных, трапециевидных, пятиугольных, Гауссовых). Описано использование нечетких множеств для оценивания условий среды применения БЛА. Разработан алгоритм определения вероятности повреждения БЛА в результате воздействия атмосферных факторов среды. Проведён вычислительный эксперимент для определения сложности расчёта вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий при различных условиях среды: «умеренных условиях» при скорости ветра 3 м/с, интенсивности атмосферных осадков 0,8 мм/ч и температуре воздуха 5 ºС; «очень сложных условиях» внешней среды при скорости ветра 12 м/с, интенсивности атмосферных осадков 3,5 мм/ч и температуре воздуха –6 ºС. Установлено, что использование треугольных функций принадлежности для расчёта вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий обеспечивает более высокое быстродействие по сравнению с остальными (трапециевидными, пятиугольными, Гауссовыми).
Обсуждение и заключения. Полученные при реализации методики значения вероятностей повреждения БЛА в условиях атмосферных воздействий внешней среды могут использоваться на этапе предполётной подготовки и в процессе полёта для оценки целесообразности дальнейшего выполнения полётного задания. На основе проведенного анализа применения рассмотренных форм функций принадлежности даны рекомендации по их применению. Использование алгоритмов с треугольными функциями принадлежности обеспечит высокое быстродействие работы систем управления БЛА (СУ БЛА).

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, функция принадлежности, нечеткие множества, математическая модель, управление, атмосферные воздействия.

Благодарности. Соавторы выражают искреннюю благодарность Чернышеву Юрию Олеговичу за его наставничество, ценные советы, критику и живое участие в данной работе.

Для цитирования. Методика определения вероятности повреждения беспилотных летательных аппаратов в результате воздействия атмосферных факторов внешней среды / Д. Г. Белоножко, И. Д. Королев, Ю. О. Чернышев, Н. Н. Венцов // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 3. — С. 193–203. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-193-203

Original article

Methodology for Determining the Probability of Damage to UAV as a Result of Exposure to Atmospheric Environmental Factors

Dmitriy G. Belonozhko[1] ✉, **Igor D. Korolev**[1], **Yury O. Chernyshev**[2], **Nikolay N. Ventsov**[2]

[1] Krasnodar Higher Military School named after army general S. M. Shtemenko, 4, ul. Krasina, Krasnodar, Russian Federation

[2] Don State Technical University, 1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

Introduction. For the effective use of unmanned aerial vehicles (UAV), it is required to take into account the impact of atmospheric environmental factors. Based on the existing level of development of the research and methodological apparatus, it is impossible to determine the probability of damage to the UAV under the conditions of complex exposure to atmospheric environmental factors and to assess the feasibility of further performance of the flight task. Violation of the UAV operation process is caused by the influence of atmospheric precipitation, wind and temperature conditions of the environment. The work aims at the development of a methodology for determining the probability of damage to UAV as a result of exposure to atmospheric environmental factors, as well as to evaluate the performance of the software package implementing the developed algorithm using triangular, trapezoidal, pentagonal, and Gaussian membership functions.

Materials and Methods. A technique is proposed that makes it possible, using the theory of fuzzy logic, to determine the probability of damage to the UAV with inaccuracies and uncertainties in the description of atmospheric effects of the environment. It takes into account possible atmospheric forcing and enables to determine the probability of damage to the UAV under various atmospheric influences. The computational complexity of the algorithm implementing the technique depends significantly on the number of qualitative assessments of atmospheric impacts on UAV.

Results. A method for determining the probability of damage to UAV as a result of exposure to atmospheric environmental factors based on fuzzy sets (triangular, trapezoidal, pentagonal, Gaussian) was proposed and tested. The use of fuzzy sets for estimating the conditions of the UAV application environment was described. An algorithm was developed to determine the probability of damage to the UAV as a result of exposure to atmospheric environmental factors. A computational experiment was carried out to determine the complexity of calculating the probability of UAV damage as a result of atmospheric forcing under various environmental conditions: “moderate conditions” at a wind speed of 3 m/s, precipitation intensity of 0.8 mm/h, and air temperature of 5 °C; “very heavy conditions” of the external environment at a wind speed of 12 m/s, precipitation intensity 3.5 mm/h, and air temperature of –6 ºC. It was established that the use of triangular membership functions to calculate the probability of damage to the UAV as a result of atmospheric forcing provided higher performance compared to the rest ones (trapezoidal, pentagonal, Gaussian).

Discussion and Conclusions. The values of the UAV damage probabilities obtained during the implementation of the methodology under atmospheric environmental influences can be used at the pre-flight preparation stage and during the flight to assess the feasibility of further performance of the flight task. Based on the analysis of the application of the considered forms of membership functions, recommendations for their application are given. The use of algorithms with triangular membership functions will provide high performance of UAV control systems (UAV CS).

Keywords: unmanned aerial vehicle, membership function, fuzzy sets, mathematical model, control, atmospheric forcing.

Achnowledgments. The co-authors express their sincere gratitude to Yuri Olegovich Chernyshev for his mentoring, valuable advice, criticism, and lively participation in this work.

For citation. D. G. Belonozhko, I. D. Korolev, Yu. O. Chernyshev, N. N. Ventsov. Methodology for Determining the Probability of Damage to UAV as a Result of Exposure to Atmospheric Environmental Factors. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 193–203. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-193-203

Введение. Анализ опыта применения БЛА показал, что особенно актуальным является повышение эффективности применения БЛА в условиях воздействий внешней среды [1–4]. Оборудование современных беспилотных летательных аппаратов позволяет производить измерения и оценку состояния технических систем, параметров полета и внешней среды [2].

При быстром обновлении текущей полетной информации и ее большом объеме реализация управления сталкивается с проблемой обеспечения устойчивого функционирования БЛА в условиях воздействия внешней среды. Стоит отметить, что человеческие способности ограничены, а в условиях резко меняющейся обстановки ряд параметров БЛА и внешней среды, таких как температура и обороты двигателя, скорость ветра и интенсивность осадков, в силу ограниченности человеческих возможностей могут быть не учтены или упущены из виду. Подобные неточности управления могут привести к выходу из строя оборудования БЛА или его повреждению [3]. Влияние факторов внешней среды на БЛА может существенно снизить качество выполнения задания, а при определенных значениях параметров внешних воздействий и вовсе исключить возможность применения БЛА [4].

В этой связи решение задач, связанных с сохранением эффективного функционирования БЛА в различных атмосферных условиях, является важным этапом при составлении требований к бортовому оборудованию БЛА, обеспечивающему безопасность полетов в аварийных ситуациях, возникающих под действием различных погодных явлений [4].

Материалы и методы. Решение проблемы представляется авторам в автоматизации процесса оценки параметров внешней среды для определения вероятности повреждения БЛА и выработки управления, соответствующего текущей обстановке. В работах [1–5] в качестве дестабилизирующих воздействий внешней среды рассматриваются метеорологические условия, например, атмосферные осадки, ветровые нагрузки, температура, давление воздуха и влажность. Для описания атмосферных воздействий внешней среды[1] используется вероятностная модель в сочетании с теорией случайных процессов. Известен также способ оценки интенсивности осадков и водности облаков на основе данных дистанционных измерений[2]. Авторами также отмечается, что естественная изменчивость и стохастический характер атмосферных условий не дают возможность установить строгие математические зависимости для описания атмосферных условий среды.

При неопределенности параметров и неполной информации о состоянии внешней среды не всегда возможно представить ее непреднамеренное воздействие в виде четких величин. Эта проблема может быть решена с помощью теории нечетких множеств. В случае ее применения нет необходимости знать точную математическую модель атмосферных воздействий внешней среды для оценки ее влияния на БЛА[3]. Оценка условий функционирования сложных систем является одной из областей, где нечеткие множества широко используются для устранения неточной природы воздействия внешней среды [6].

Таким образом, анализ известных исследований в данной области[3] показывает, что в автоматизированных системах прогнозирования и поддержки принятия решений в условиях недостатка и неопределенности исходной информации для её обработки, хорошо зарекомендовали себя методы нечеткой логики.

Результаты исследования

Разработка методики определения вероятности повреждения БЛА в результате воздействия атмосферных факторов среды

В [6] отмечается особенность, которая отличает интеллектуальную систему автоматического управления от построенной по «традиционной» схеме. Она связана с использованием механизмов обработки знаний для выполнения требуемых функций в неопределенных (или неполно заданных) условиях при случайном характере внешних возмущений. Интеллектуализация процесса функционирования БЛА для учета факторов неопределенности может быть достигнута за счет применения базы знаний и механизма логического вывода [6].

---

[1] Вероятностная модель поиска и обнаружения наземных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов в условиях нерегулярных воздействий внешней среды / И. Е. Кузнецов [и др.] // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020) : мат-лы VI междунар. конф. и молодежной школы. В 4 т. Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2020. Т. 3. С. 152–156.

[2] Кузнецов И. Е., Булгин Д. В. Методика оценки интенсивности осадков и водности облаков на основе данных дистанционных измерений // Факультет компьютерных наук Воронежского ун-та : [сайт]. URL: https://www.cs.vsu.ru/ipmt-conf/conf/2021/works/2/1744.dokl.pdf

[3] Черепанов Д. В., Кузнецов И. Е. Модель прогнозирования степени сложности метеоусловий с учетом теории нечеткой логики // Факультет компьютерных наук Воронежского ун-та : [сайт]. URL: https://www.cs.vsu.ru/ipmt-conf/conf/2021/works/2.85/1793.dokl.pdf

Чтобы определить значение вероятности повреждения БЛА в результате воздействия факторов внешней среды необходимо:

1. Сформулировать нечеткие оценки атмосферных воздействий:

– скорости ветра;

– интенсивности осадков;

– температурных условий среды.

2. Разработать нечеткую модель вычисления вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий среды.

3. Создать базу правил нечеткого логического вывода влияния атмосферных воздействий на БЛА.

4. Осуществить нечеткий логический вывод.

5. Произвести дефаззификацию нечеткого значения вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий среды $P_{\text{АВ}}$.

Функциональная схема методики представлена на рис. 1.



Рис. 1. Функциональная схема методики определения вероятности повреждения БЛА в результате воздействия атмосферных факторов среды

Требуется определить вероятность повреждения БЛА на основе анализа входной нечеткой ситуации. Рассмотрим подробно этапы работы предложенной методики.

Оценка условий среды применения БЛА

Атмосферные факторы внешней среды (ветер, осадки и температура воздуха) в процессе полета могут изменяться. Динамическое изменение параметров среды оказывает значительное влияние на устойчивость функционирования БЛА [7]. В качестве типового рассматривается БЛА малой дальности, выполненный по аэродинамической схеме самолетного типа со скоростями полета в диапазоне от 20 до 60 м/с. Обледенение поверхностей такого БЛА может привести к изменению его массы, а также аэродинамических характеристик. Скорость ветра может изменяться в зависимости от высоты, времени полёта и имеет существенное влияние на БЛА рассматриваемого класса [8]. По этой причине оценку атмосферных воздействий целесообразно осуществлять на основе динамических нечетких подходов. Исходными данными для функциональной модели являются условия среды: скорость ветра e, интенсивность осадков g и температура воздуха t.

Для оценки влияния ветра, воздействующего на БЛА в момент времени t, введём множество треугольных нечетких чисел:

$$E(t) = \left\{\tilde{E}_1(t), \tilde{E}_2(t), \dots, \tilde{E}_w(t), \dots, \tilde{E}_{N_{E(t)}}(t)\right\}, \quad (1)$$

где $E(t)$ — множество треугольных нечетких чисел, описывающих соответствие текущей скорости ветра e нечетким оценкам воздействий ветра на БЛА в момент времени t; $\tilde{E}_w(t)$ — треугольное нечеткое число, описывающее соответствие текущей скорости ветра e нечеткой оценке воздействий ветра на БЛА в момент времени t; $w = \overline{1, N_{E(t)}}$.

В соответствии с понятием нечеткого множества, треугольное нечеткое число $\tilde{E}_w(t)$ можно понимать как [9, 10]:

$$\tilde{E}_w(t) = \left\{\left(e, \mu_{\tilde{E}_w(t)}(e)\right)\right\}, \quad (2)$$

где $\mu_{\tilde{E}_w(t)}(e)$ — функция принадлежности скорости ветра e к оценке воздействия $\tilde{E}_w(t)$ ветра на БЛА.

В рамках разрабатываемой модели качественная оценка воздействия ветра на БЛА зависит только от его скорости, т. е. не учитываются возможные неоднородности ветрового потока и его направление.

Функция принадлежности треугольного нечеткого числа $\mu_{\tilde{E}_w(t)}(e)$ может быть представлена кортежем из трёх элементов:

$$\mu_{\tilde{E}_w(t)}(e) = \langle l_{\tilde{E}_w}(t); c_{\tilde{E}_w}(t), r_{\tilde{E}_w}(t)\rangle, \quad (3)$$

где $c_{\tilde{E}_w}(t)$ — четкое значение скорости ветра, наиболее точно соответствующее качественной оценке $\tilde{E}_w(t)$ воздействия ветра на БЛА в момент времени t; $l_{\tilde{E}_w}(t)$ и $r_{\tilde{E}_w}(t)$ — четкие значения скорости ветра в наименьшей не нулевой степени соответствующее качественной оценке $\tilde{E}_w(t)$ воздействия ветра на БЛА в момент времени t. Значения $l_{\tilde{E}_w}(t)$ и $r_{\tilde{E}_w}(t)$ определяют нечеткость оценки $\tilde{E}_w(t)$. В случае, если $l_{\tilde{E}_w}(t) = r_{\tilde{E}_w}(t) = c_{\tilde{E}_w}(t)$, то оценка становится четкой.

Например, $\tilde{E}_1(t)$ может означать несущественную оценку воздействия ветра на БЛА. Если экспертами принято решение, что максимальная скорость ветра, при которой его воздействие на БЛА в текущих условиях полёта в момент времени t можно трактовать как несущественное, равна 0,8 м/с, то функция принадлежности нечеткого числа примет вид $\mu_{\tilde{E}_1(t)}(e)$ = (0;0;0,8). Так как первый и второй элементы кортежа равны нулю, область не нулевой принадлежности находится на замкнутом промежутке [0, 0,8]. Для определения степени принадлежности $\mu_{\tilde{E}_1(t)}(e)$ воздействия ветра со скоростью e к нечеткой оценке воздействия $\tilde{E}_1(t)$ надо подставить e в уравнение прямой, проходящей через точки (0;1) и (0,8;0).

В процессе полета БЛА может в автономном режиме определять фактическую скорость ветра. На основе заданных экспертами значений кортежей из трёх элементов, по аналогии с приведённым выше примером, сформулируем возможные оценки влияния ветра на БЛА. Для этого значения треугольных функций принадлежности нечетких множеств $\tilde{E}_w(t)$ от значений скорости ветра e представим графиками (рис. 2):

– $\tilde{E}_1(t)$ — «несущественное влияние», $\mu_{\tilde{E}_1(t)}(e)$ = (0;0;0,8);

– $\tilde{E}_2(t)$ — «очень слабое влияние», $\mu_{\tilde{E}_2(t)}(e)$ = (0;1;3);

– $\tilde{E}_3(t)$ — «слабое влияние», $\mu_{\tilde{E}_3(t)}(e)$ = (0,2;2,5;4,8);

– $\tilde{E}_4(t)$ — «сильное влияние», $\mu_{\tilde{E}_4(t)}(e)$ = (1,5;4,2;6,9);

– $\tilde{E}_5(t)$ — «очень сильное влияние», $\mu_{\tilde{E}_5(t)}(e)$ = (1,5;7;12,5);

– $\tilde{E}_6(t)$ — «опасное влияние», $\mu_{\tilde{E}_6(t)}(e)$ = (5;11;18);

– $\tilde{E}_7(t)$ — «очень опасное влияние», $\mu_{\tilde{E}_7(t)}(e) = (10;15;\infty)$.

По аналогии с оценкой влияния ветра рассмотрим оценки влияния атмосферных осадков и температуры, воздействующих на БЛА, в момент времени t.

Для оценки влияния атмосферных осадков введём множество треугольных нечетких чисел:

$$G(t) = \left\{\tilde{G}_1(t), \tilde{G}_2(t), \dots, \tilde{G}_h(t), \dots, \tilde{G}_{N_{G(t)}}(t)\right\}, \quad (4)$$

где $G(t)$ — множество треугольных нечетких чисел, описывающих соответствие текущей интенсивности атмосферных осадков g нечетким оценкам воздействий осадков на БЛА в момент времени t; $\tilde{G}_h(t)$ — треугольное нечеткое число, описывающее соответствие текущей интенсивности осадков g нечеткой оценке воздействий осадков на БЛА в момент времени t; $h = \overline{1, N_{G(t)}}$.

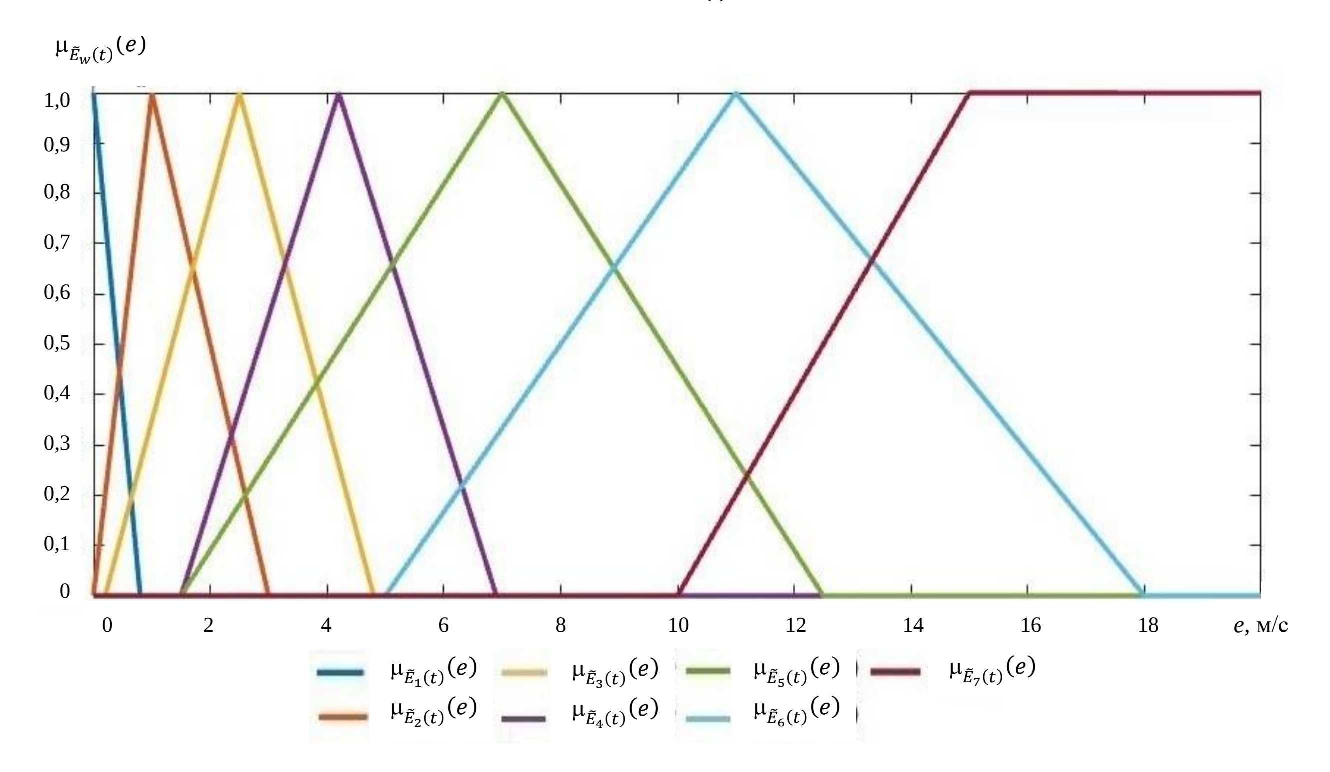


Рис. 2. Графики зависимостей треугольных функций принадлежности нечетких множеств $\tilde{E}_w(t)$ от значений скорости ветра e

Для оценки влияния температуры введём множество треугольных нечетких чисел:

$$Q(t) = \left\{\tilde{Q}_1(t), \tilde{Q}_2(t), \dots, \tilde{Q}_s(t), \dots, \tilde{Q}_{N_{Q(t)}}(t)\right\}, \quad (5)$$

где $Q(t)$ — множество треугольных нечетких чисел, описывающих соответствие текущей температуры q нечетким оценкам воздействий температуры на БЛА в момент времени t; $\tilde{Q}_s(t)$ — треугольное нечеткое число, описывающее соответствие текущей температуры q нечеткой оценке воздействий температуры на БЛА в момент времени t; $s = \overline{1, N_{Q(t)}}$.

В разрабатываемой модели влияние погодных условий оценивается на основе трех множеств $E(t)$, $G(t)$, и $Q(t)$. Элементам этих множеств соответствуют треугольные функции принадлежности, что упрощает адаптацию модели. Для корректировки функции принадлежности необходимо только изменить значения воздействия атмосферы, которые в наибольшей и/или наименьшей степени соответствуют адаптируемой нечеткой оценке.

Алгоритм определения вероятности повреждения БЛА в результате воздействия атмосферных факторов среды

Для реализации методики разработан алгоритм определения вероятности повреждения БЛА в результате воздействия атмосферных факторов среды. Алгоритм позволяет в условиях неопределенности учитывать

влияние атмосферных факторов среды для вычисления вероятности повреждения БЛА в соответствии с текущей обстановкой. Исходными данными для алгоритма являются нечеткие множества $\tilde{E}_w(t)$, $\tilde{G}_h(t)$ и $\tilde{Q}_s(t)$.

На рис. 3 представлена его структурная схема.

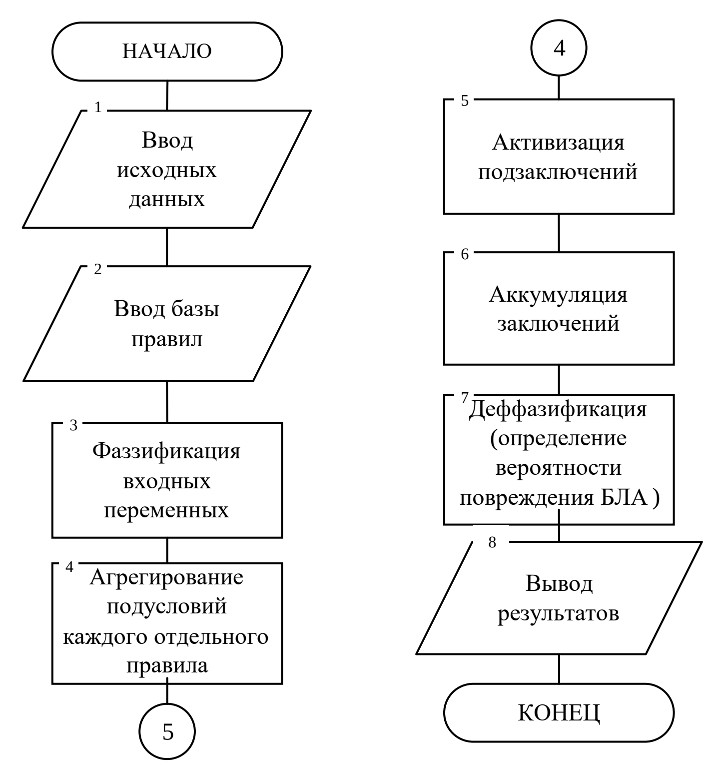


Рис. 3. Структурная схема алгоритма определения вероятности повреждения БЛА в результате воздействия атмосферных факторов среды

Определение вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий среды

В работах [4, 5] отмечается естественная изменчивость и стохастический характер атмосферных условий. В связи с тем, что атмосферные воздействия внешней среды имеют динамический характер, целесообразно учитывать это обстоятельство при построении модели определения вероятности повреждения (выхода из строя оборудования) БЛА. Введём множество треугольных нечетких чисел:

$$I(t) = \left\{\tilde{I}_1(t), \tilde{I}_2(t), \dots, \tilde{I}_z(t), \dots, \tilde{I}_{N_{I(t)}}(t)\right\}, \tag{6}$$

где $I(t)$ — множество треугольных нечетких чисел, описывающих соответствие текущего значения вероятности повреждения БЛА $P_{\text{АВ}}$ в момент времени t; $\tilde{I}_z(t)$ — треугольное нечеткое число, описывающее соответствие текущего значения вероятности повреждения БЛА $P_{\text{АВ}}$ к нечеткой оценке уровня воздействия на БЛА атмосферных факторов среды в момент времени t; $z = \overline{1, N_{I(t)}}$.

Применительно к уровням работоспособности БЛА [11] (работоспособное, ограниченно работоспособное и неработоспособное состояние) рассмотрим следующие вероятности повреждения БЛА: $\tilde{I}_1(t)$ — «низкая» (примерно 0,2), $\tilde{I}_2(t)$ — «средняя» (примерно 0,5) и $\tilde{I}_3(t)$ — «высокая» (примерно 0,8). Треугольное нечеткое число $\tilde{I}_z(t)$ представим как [9, 10]:

$$\tilde{I}_z(t) = \left\{\left(P_{\text{АВ}}, \mu_{\tilde{I}_z(t)}(P_{\text{АВ}})\right)\right\}, z = \overline{1,3}, \tag{7}$$

где $\mu_{\tilde{I}_z(t)}(P_{\text{АВ}})$ — функция принадлежности вероятности повреждения БЛА $P_{\text{АВ}}$ к оценке воздействия $\tilde{I}_z(t)$ ветра на БЛА.

В связи с тем, что рассматриваемая модель имеет динамический характер, составлению базы правил нечеткого логического вывода должно предшествовать изучение влияния атмосферных условий на вероятность повреждения БЛА. Для этого была проведена серия опытов в различных условиях среды. На основании экспертных оценок статистических данных формируется база правил нечеткого логического вывода [10]. Правила определения качественных оценок вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий внешней среды формализованы при помощи нечетких множеств следующим образом:

$$\text{If } q \text{ is } \tilde{Q}_s(t) \text{ and } e \text{ is } \tilde{E}_w(t) \text{ and } g \text{ is } \tilde{G}_h(t) \text{ then is } \tilde{I}_z(t). \tag{8}$$

Т. е. при одновременных условиях минимально достаточной принадлежности:

– температуры q к нечеткой оценке воздействия температуры $\tilde{Q}_s(t)$;

– принадлежности скорости ветра e к нечеткой оценке воздействия ветра $\tilde{E}_w(t)$;

– принадлежности интенсивности осадков g к нечеткой оценке воздействия осадков $\tilde{G}_h(t)$ актуальной становится нечеткая оценка вероятности $\tilde{I}_z(t)$.

Для получения четкого значения $P^*_{\text{АВ}}(t)$ вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий внешней среды в момент времени *t*, необходимо выполнить дефаззификацию соответствующего нечеткого результата по формуле [10]:

$$P^*_{\text{АВ}}(t) = \frac{\int_0^1 \tilde{P}_{\text{АВ}} \cdot \mu^{\text{рез}}_{\tilde{I}_z(t)}(\tilde{P}_{\text{АВ}}) d\tilde{P}_{\text{АВ}}}{\int_0^1 \mu^{\text{рез}}_{\tilde{I}_z(t)}(\tilde{P}_{\text{АВ}}) d\tilde{P}_{\text{АВ}}}, \qquad (9)$$

где $\mu^{\text{рез}}_{\tilde{I}_z(t)}(\tilde{P}_{\text{АВ}})$ — результирующая функция принадлежности нечеткого множества $\tilde{I}_z$, представляющего общий вывод (заключение) из всех правил (8); $\tilde{P}_{\text{АВ}}$ — выходная переменная нечеткого логического вывода, характеризующая нечеткое значение вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий среды.

Таким образом, интеллектуализация процесса функционирования достигается за счет применения базы знаний и механизма логического вывода и обеспечивает учет факторов неопределенности [6].

Схема процесса функционирования БЛА в условиях воздействия среды

Для вычисления значения вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий среды необходимо осуществить нечеткий логический вывод. Он заключается в последовательном выполнении операций агрегирования, активизации и аккумуляции [10]. Схема процесса функционирования БЛА в условиях воздействия среды представлена на рис. 4.

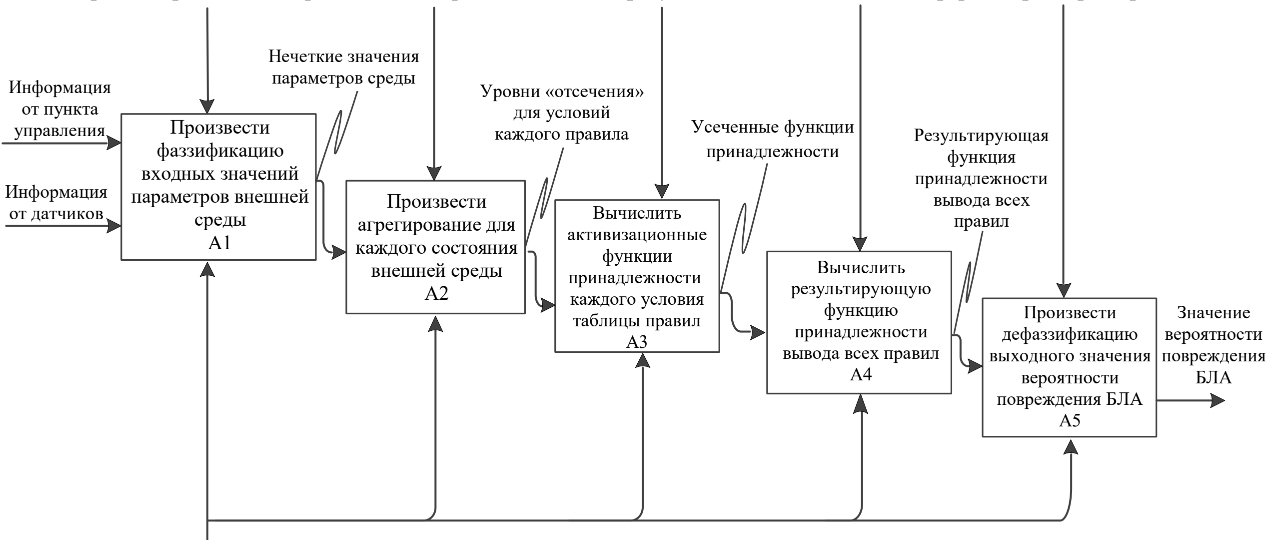


Рис. 4. Схема процесса функционирования БЛА в условиях воздействия атмосферных факторов среды

Вычислительный эксперимент

В работе [12] для выявления формальных подходов к работе с неопределенностями проведен анализ зарубежной периодической литературы за последние годы. Сделан вывод о целесообразности применении *n*-угольных чисел для определения точности формализации неопределенности. Так, при использовании треугольного представления нечетких чисел [10] каждое исходное нечеткое число описывается тремя скалярными значениями, что существенно упрощает вычислительный процесс.

Во многих случаях треугольные и трапециевидные представления нечетких чисел оказываются недостаточными. Если необходимо учитывать более сложное влияние неопределенностей, например, по причине большой подверженности оборудования, установленного на БЛА, воздействию атмосферных осадков, целесообразно использовать более сложные формы функций принадлежности [12, 13]. Так, в работе [13] в качестве альтернативы изучены пятиугольные нечеткие числа, которые гораздо точнее отражают неопределенности.

Рассмотрим основные наиболее применяемые функции принадлежности для представления нечетко определенных лингвистических термов: гауссовы, треугольные, трапециевидные [10] и пятиугольные нечеткие числа [13, 14].

На основании анализа работ [13, 14] представим пятиугольную функции принадлежности элементов к нечетким множествам воздействий ветровых нагрузок $\tilde{E}_w(t)$ в виде кортежа:

$$\mu_{\tilde{E}_w(t)}(e) = \langle l_{\tilde{E}_w}(t); k_{\tilde{E}_w}(t); c_{\tilde{E}_w}(t); p_{\tilde{E}_w}(t); r_{\tilde{E}_w}(t), \alpha \rangle, \quad (10)$$

где $c_{\tilde{E}_w}(t)$ — четкое значение скорости ветра наиболее точно соответствующее качественной оценке $\tilde{E}_w(t)$ воздействия ветра на БЛА в момент времени t; $l_{\tilde{E}_w}(t)$ и $r_{\tilde{E}_w}(t)$ — четкие значения скорости ветра в наименьшей (не нулевой) степени соответствующее качественной оценке $\tilde{E}_w(t)$ воздействия ветра на БЛА в момент времени t; $k_{\tilde{E}_w}(t)$ и $p_{\tilde{E}_w}(t)$ — четкие значения скорости ветра со степенью α (не нулевой) соответствующее качественной оценке $\tilde{E}_w(t)$ воздействия ветра на БЛА в момент времени t. Значения $k_{\tilde{E}_w}(t)$ и $p_{\tilde{E}_w}(t)$ определяют нечеткость оценки $\tilde{E}_w(t)$. В случае если $l_{\tilde{E}_w}(t) = r_{\tilde{E}_w}(t) = k_{\tilde{E}_w}(t) = p_{\tilde{E}_w}(t)$ получаем треугольное нечеткое число. Изменяя значения уровня α получаем различную форму пятиугольной функции принадлежности (рис. 5).

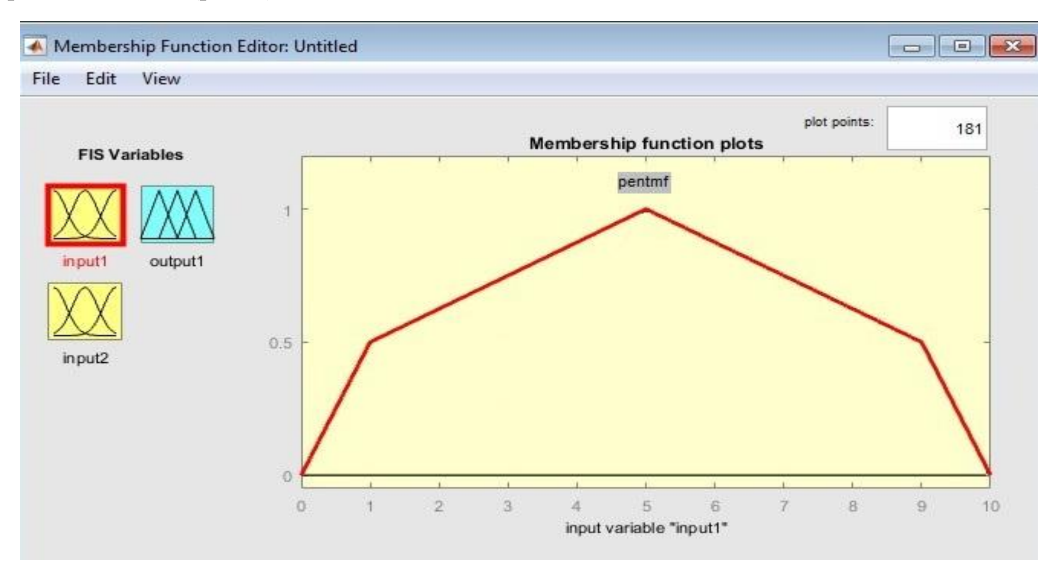


Рис. 5. Пятиугольная функция принадлежности в программной среде *MATLAB*

Для исследования пятиугольной функции принадлежности в программной среде необходимо ее описать в виде программного кода. При реализации алгоритмов[4,5] в пакете прикладных программ *Fuzzy Logic Toolbox* программной среды *MATLAB*, разработана пользовательская пятиугольная функция принадлежности. Данное средство позволяет исследовать математические модели и алгоритмы, основанные на применении теории нечеткой логики.

Для оценки точности неопределенности при работе с описанными функциями принадлежности необходимо провести вычислительный эксперимент. Сравнение целесообразно проводить на одном и том же наборе исходных данных. Значения вероятности повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий вычислены в «умеренных условиях» (фактические значения: скорость ветра 3 м/с, интенсивность атмосферных осадков 0,8 мм/ч, температура воздуха 5 ºС) и «очень сложных условиях» (фактические значения: скорость ветра 12 м/с, интенсивность атмосферных осадков 3,5 мм/ч, температура воздуха – 6 ºС) внешней среды.

С использованием средств *MATLAB* оценено быстродействие работы программного комплекса, реализующего разработанный алгоритм[4] в зависимости от используемой формы функции принадлежности. Для проведения вычислительного эксперимента использована *IBM*-совместимая ПЭВМ с минимальными системными требованиями (P4 – 2500 MHz, 2048 Mb RAM, операционная система семейства *Windows*). Были оценены треугольные, трапециевидные, пятиугольные и гауссовы функции принадлежности. Результаты представлены в таблице 1.

---

[4] Программный комплекс оценки точности неопределенности и быстродействия нечетких алгоритмов для управления беспилотным летательным аппаратом : патент № 2022613419 Рос. Федерация / Д. Г. Белоножко, И. Д. Королев, Ю. О. Чернышев. № 2022613002 ; заявл. 25.02.2022 ; опубл. 14.03.2022.

[5] Программный комплекс интеллектуального управления беспилотным летательным аппаратом в условиях деструктивных воздействий на основе пятиугольных функций принадлежности : патент № 2022613691 Рос. Федерация / Д. Г. Белоножко, И. Д. Королев, Ю. О. Чернышев. № 2022613009 ; заявл. 04.02.2022 ; опубл. 15.03.2022.

Таблица 1

Среднее время работы программного комплекса

Тип используемой функции принадлежности	Время, с	
	«Умеренные условия»: скорость ветра 3 м/с, интенсивность атмосферных осадков 0,8 мм/ч, температура воздуха 5 ºС	«Очень сложные условия»: скорость ветра 12 м/с, интенсивность атмосферных осадков 3,5 мм/ч, температура воздуха — 6 ºС
Треугольная	0,028	0,028
Трапециевидная	0,031	0,03
Пятиугольная	0,034	0,035
Гауссова	0,031	0,03

Из таблицы 1 можно заключить, что программа для ЭВМ, построенная на использовании треугольных функций принадлежности, обладает более высоким быстродействием в сравнении с остальными.

Перспективным направлением исследований является изучение влияния формы функции принадлежности на точность вычислений вероятности повреждения БЛА при неопределенности воздействий атмосферных факторов внешней среды на функционирование БЛА.

Обсуждение и заключения. Разработана методика определения вероятности повреждения БЛА в результате воздействия атмосферных факторов среды, основанная на математическом аппарате нечетких множеств. Нечеткие качественные оценки позволяют значительно расширить традиционные методы математического моделирования, требующие точной информации о входных величинах. Использование данной методики позволяет оценить вероятность повреждения БЛА, когда исходы альтернатив известны неточно и вероятности их наступления оцениваются с помощью функций принадлежности. Полученные значения вероятностей повреждения БЛА в результате атмосферных воздействий внешней среды могут использоваться на этапе предполётной подготовки и в процессе полёта для оценки целесообразности дальнейшего выполнения полётного задания.

С помощью программного комплекса, реализующего данную методику, получены значения вероятности повреждения БЛА в «умеренных условиях» и «очень сложных условиях» внешней среды. По результатам проведенного анализа применения данных форм функций принадлежности и вычислительного эксперимента подтверждено высокое быстродействие программного комплекса, использующего треугольный способ формализации нечетких множеств. Существенным преимуществом треугольных функций принадлежности является то, что для их определения требуется наименьший по сравнению с остальными функциями объем информации.

Таким образом, в бортовых вычислителях СУ БЛА для оценки атмосферных параметров среды целесообразно применять алгоритмы, использующие треугольные функции принадлежности. Это обеспечит высокое быстродействие работы СУ БЛА в условиях использования вычислителей с низкой производительностью.

Список литературы

1. Fractional Order PID-Based Adaptive Fault-Tolerant Cooperative Control of Networked Unmanned Aerial Vehicles against Actuator Faults and Wind Effects with Hardware-in-the-Loop Experimental Validation / Ziquan Yu, Youmin Zhang, Bin Jiang, [et al.] // Control Engineering Practice. — 2021. — Vol. 114. — Art. 104861. http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104861

2. Веселов, Г. Е. Синергетический синтез закона управления БПЛА в условиях ветровых возмущений с входными ограничениями / Г. Е. Веселов, И. А. Ингабире Алин // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2020. — № 2 (212). — С. 101–112. https://doi.org/10.18522/2311-3103-2020-2-101-112

3. Adaptive Super-Twisting Trajectory Tracking Control for an Unmanned Aerial Vehicle under Gust Winds / Lei Cui, Ruizhi Zhang, Hongjiu Yang, Zhiqiang Zuo // Aerospace Science and Technology. — 2021. — Vol. 115. — Art. 106833. http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2021.106833

4. Методика учета влияния метеорологических факторов на эффективность применения беспилотных летательных аппаратов на основе системного анализа / И. Е. Кузнецов, А. В. Мельников, Е. А. Рогозин, О. В. Страшко // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2018. — Т. 45, № 2. — С. 125–139. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-2-125-139

5. The Mathematical Model of Characteristics of the Convective Unstable Atmosphere Taking into Account Microphysical Processes in Clouds / I. E. Kuznetsov, O. V. Strashko, V. V. Dorofeev, D. V. Gotsev // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — P. 012170. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1096/1/012170

6. Лохин, В. М. Повышение адаптивных свойств автономных роботов на базе интеллектуальных технологий / В. М. Лохин, С. В. Манько, М. П. Романов // Экстремальная робототехника. — 2015. — Т. 1, № 1. — С. 59–67.

7. Белоножко, Д. Г. Алгоритм обеспечения требуемого уровня устойчивости управления беспилотным летательным аппаратом в условиях противодействия / Д. Г. Белоножко // Программные продукты и системы. — 2022. — Т. 35, № 1. — С. 197–206.

8. Санько, А. А. Влияние ветра на систему угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата / А. А. Санько, И. В. Рожков, А. А. Шейников // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. — 2019. — № 1. — С. 41–51.

9. Zadeh, L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // Information and Control. — 1965. — Vol. 8. — P. 338–353. https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X

10. Piegat, A. Fuzzy Modeling and Control / A. Piegat. — Springer, 2001. — 728 p. https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6

11. Селиванов, В. В. Влияние живучести на боевую и военно-экономическую эффективность военно-технических систем / В. В. Селиванов, Ю. Д. Ильин // Военная мысль. — 2021. — № 9. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-zhivuchesti-na-boevuyu-i-voenno-ekonomicheskuyu-effektivnost-voenno-tehnicheskih-sistem (дата обращения : 08.07.2022).

12. Существующие способы формализации нечеткостей в транспортных процессах / Ю. О. Чернышев, А. В. Требухин, П. А. Панасенко, Д. Г. Белоножко // Инженерный вестник Дона. — 2021. — № 7 (79). — С. 57–79.

13. Pathinathan, T. Reverse Order Triangular, Trapezoidal and Pentagonal Fuzzy Numbers / T. Pathinathan, K. Ponnivalavan // Annals of Pure and Applied Mathematics. — 2015. — Vol. 9. — P. 107–117.

14. The Pentagonal Fuzzy Number: Its Different Representations, Properties, Ranking, Defuzzification and Application in Game Problems / Avishek Chakraborty, Sankar Prasad Mondal, Shariful Alam [et al.] // Symmetry. — 2019. — Vol. 11. — P. 1–31. http://dx.doi.org/10.3390/sym11020248

Поступила в редакцию 08.07.2022
Поступила после рецензирования 22.07.2022
Принята к публикации 25.07.2022

Об авторах:

Белоножко Дмитрий Григорьевич, заместитель начальника отдела, начальник «Научно-исследовательской лаборатории», Краснодарского высшего военного училища им. С. М. Штеменко (350009, РФ, г. Краснодар, ул. Грибоедова, 18), ORCID, staeer@rambler.ru

Королев Игорь Дмитриевич, профессор кафедра «Защиты информации специальными методами и средствами», Краснодарское высшее военное училище им. С. М. Штеменко (350009, РФ, г. Краснодар, ул. Грибоедова, 18), доктор технических наук, профессор, ORCID, pi_korolev@mail.ru

Чернышев Юрий Олегович, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID, myvnn@list.ru

Венцов Николай Николаевич, доцент кафедры «Информационные технологии» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, vencov@list.ru

Заявленный вклад соавторов:

Д. Г. Белоножко — анализ литературных источников, постановка задачи, проведение исследований, разработка математической модели и алгоритма, проведение расчетов и описание полученных результатов. И. Д. Королев — научное руководство, формирование концепции исследования, формулирование выводов исследования. Ю. О. Чернышев — формирование структуры статьи, описание результатов, критический анализ, редактирование текста. Н. Н. Венцов — анализ литературных источников, участие в исследовании, редактирование текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МЕХАНИКА
MECHANICS







УДК 531.132.1

Научная статья

https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-204-213



Применение блока инерциальных датчиков для оценивания положения и управления движением экзоскелета нижних конечностей

Г. Р. Сайпулаев, М. Р. Сайпулаев, И. В. Меркурьев, Б. И. Адамов, Р. Б. Гарсиа

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Российская Федерация, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14

✉ saypulaevgr@mail.ru

Аннотация

Введение. Исследуется задача управления движением экзоскелета нижних конечностей. Для ее решения предлагается задействовать программное управление и управление в виде обратной связи. Формирование управления в виде обратной связи требует оценки состояния экзоскелета (углы поворота, угловые скорости и ускорения звеньев). Рассматривается возможность применения блока инерциальных датчиков для оценки угловых скоростей и ускорений звеньев экзоскелета. Цель работы — определить законы формирования управления движением экзоскелета, которые обеспечат устойчивость программного движения и будут использовать измерения энкодеров, микромеханических гироскопов и акселерометров.

Материалы и методы. Ранее выполненное математическое моделирование динамики экзоскелета задействовали при формировании программного управления. Предложили оснастить экзоскелет блоками инерциальных датчиков. Это решение позволяет оценивать вектор состояния экзоскелета и использовать данные оценки в цепи обратной связи. Описали математическую модель измерений указанных датчиков. Предложенный вариант пригоден для систем управления трехзвенными экзоскелетами нижних конечностей и может быть расширен для многозвенных.

Результаты исследования. Предложены новые законы управления движением экзоскелета, основанные на математической модели динамики системы и использующие измерительную информацию с энкодеров и инерциальных датчиков. В математическом пакете Wolfram Mathematica выполнено численное моделирование движения экзоскелета. Его итоги подтвердили работоспособность предложенного управления и возможность использования блока инерциальных датчиков для оценки состояния экзоскелета. Приводятся результаты численного моделирования для следующих программных движений: подъем экзоскелета из положения сидя в вертикальное и стабилизация вертикального положения равновесия.

Обсуждение и заключения. Предлагаемое управление применимо в экзоскелетах для медицинских приложений (например, в задаче вертикализации пациентов с нарушениями функций опорно-двигательного аппарата). Показана возможность использования измерительной информации, полученной от блоков инерциальных датчиков, в задаче оценки состояния звеньев экзоскелета. Применение инерциальных датчиков позволит определять угловое ускорение звеньев экзоскелета, избегая численного дифференцирования измерительной информации, полученной от энкодеров. Оценки углового ускорения позволяют вводить в систему управления обратную связь по угловым ускорениям, что открывает возможность улучшить переходные процессы при управлении движением экзоскелета.

Ключевые слова: экзоскелет, математическая модель, инерциальные датчики, управление, оценка состояния.

Финансирование. Исследование проводилось в рамках проекта «Разработка макетного образца активного экзоскелета на базе электрогидропневмопривода, увеличивающего физические способности человека и качество процессов управления движением» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программ научных исследований «Энергетика», «Электроника, радиотехника и IT» и «Технологии индустрии 4.0 для промышленности и робототехники» в 2020–2022 гг.

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их совершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

Для цитирования. Применение блока инерциальных датчиков для оценивания положения и управления движением экзоскелета нижних конечностей / Г. Р. Сайпулаев, М. Р. Сайпулаев, И. В. Меркурьев [и др.] // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 3. — С. 204–213. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-204-213

Original article

Application of an Inertial Sensor Unit for Position Estimation and Motion Control of the Lower-Extremity Powered Exoskeleton

Gasan R. Saypulaev✉, **Musa R. Saypulaev**, **Igor V. Merkuryev**, **Boris I. Adamov**, **Roilan B. Garcia**
National Research University (MPEI), 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow, Russian Federation
✉ saypulaevgr@mail.ru

Abstract
Introduction. The problem of controlling the lower-extremity powered exoskeleton motion was investigated. To solve it, it was proposed to use a program control and feedback control. The formation of control in the form of feedback required an assessment of the state of the exoskeleton (rotation angles, angular velocities, and accelerations of the links). The possibility of using an inertial measuring unit to estimate angular velocities and accelerations of exoskeleton links was considered. The work objective was to develop laws for the formation of the exoskeleton motion control, which could provide the stability of the program motion and use the measurements of encoders, micromechanical gyroscopes and accelerometers.
Materials and Methods. Previously performed mathematical modeling of the exoskeleton dynamics was used to form a program control. It was proposed to equip the exoskeleton with inertial sensor units. This solution made it possible to evaluate the state vector of the exoskeleton and to use these estimates in a feedback loop. A mathematical model of measurements of these sensors was described. The proposed version is suitable for control systems of three-link exoskeletons of the lower extremities and can be expanded to the case of multi-link exoskeleton designs.
Results. New laws of exoskeleton motion control based on a mathematical model of the system dynamics and using measurement information from encoders and inertial information sensors were proposed. Numerical simulation of exoskeleton motion was performed in the Wolfram Mathematica mathematical package. Its results confirmed the operability of the proposed control and the possibility of using an inertial sensor unit to assess the exoskeleton state. The numerical simulation results for the following program movements were presented: lifting the exoskeleton from a sitting position to a vertical position, and stabilization of the vertical equilibrium position.
Discussion and Conclusions. The proposed control can be applied in exoskeletons for medical purposes, e.g., in the task of verticalization of patients with dysfunctions of the musculoskeletal system. The possibility of using measurement information obtained from inertial measurements units in the problem of estimating the state of exoskeleton links was demonstrated. The use of inertial sensors will make it possible to determine the angular acceleration of the exoskeleton links, avoiding numerical differentiation of the measurement information received from the encoders. The obtained estimates of angular acceleration allow us to introduce feedback on angular accelerations into the control system, which opens up the possibility of improving transients in controlling the exoskeleton motion.

Keywords: exoskeleton, mathematical model, inertial sensors, control, state estimation.

Funding information. The research was carried out within the framework of the project "Development of a prototype of an active exoskeleton based on an electrohydropneumatic actuator that increases human physical abilities and the quality of motion control processes". It was supported by the grant from the National Research University (MPEI) for the implementation of research programs "Power Engineering", "Electronics, Radio Engineering, and IT", and "Industry 4.0 Technologies for Manufacturing and Robotics" in 2020–2022.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions for their improvement contributed significantly to the quality of this article.

For citation. G. R. Saypulaev, M. R. Saypulaev, I. V. Merkuryev, B. I. Adamov, R. B. Garcia. Application of an Inertial Sensor Unit for Position Estimation and Motion Control of the Lower-Extremity Powered Exoskeleton. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 204–213. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-204-213

Введение. Разработка и применение экзоскелетов — устройств, предназначенных для облегчения движения и повышения двигательной эффективности человека, — перспективное направление развития робототехники.

Экзоскелеты все шире применяются в промышленности [1], военном деле [2], медицине [3] и других областях. Этим обусловлена актуальность исследований, посвященных их схемотехническому и конструкционному исполнению, оптимизации энергозатрат, траектории движения, динамике, управлению.

В представленной работе рассматривается активный экзоскелет нижних конечностей человека с жесткой конструкцией силового каркаса. Его используют для реабилитации пациентов с нарушениями функций опорно-двигательного аппарата.

При разработке таких экзоскелетов возникает необходимость решения взаимосвязанных научно-технических задач. В их числе:

– формирование скелетной схемы;

– математическое моделирование движения экзоскелета [4–6];

– оптимизация движения звеньев на основе математической модели кинематики и динамики[1];

– рациональное построение двигательной системы [7, 8];

– разработка алгоритмов управления [9–11] и оценивания [13, 14].

Все перечисленные задачи связывает проблема поиска управляющих воздействий для программного движения. Их источником может быть, во-первых, динамическая модель системы. Во-вторых, они формируются в виде пропорционального интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора, используемого для стабилизации программного движения. Возможна также комбинация двух способов. При этом для формирования управления по принципу обратной связи (в частности в виде ПИД регулятора) важную роль играют алгоритмы оценивания состояния динамической системы и набор датчиков, показатели которых используются в алгоритмах.

Для получения информации о положении звеньев экзоскелетов их оснащают энкодером или гироскопом [9–14]. Другие возможные варианты: акселерометр, магнитометр, потенциометр, датчики момента, силы, биосигналов и др.

В [13] на каждом звене экзоскелета предлагается использовать по одному блоку инерциальных датчиков, состоящих из гироскопов и акселерометров. Такое решение позволит оценивать углы поворота, угловые скорости и ускорения. При этом модель измерений получается нелинейной, что усложняет структуру систем управления и наблюдения.

Цель работы — улучшение управления экзоскелетом за счет использования двух инерциальных блоков, закрепленных на каждом звене экзоскелета. Такой подход позволяет оценивать углы поворота, угловые скорости и ускорения экзоскелета. С помощью предлагаемого варианта расположения гироскопов и акселерометров можно получить линейную модель измерений, что откроет пути для упрощения системы управления и применения теории оптимального оценивания линейных систем [15]. Это, в свою очередь, станет базой для совершенствования управления движением экзоскелета. Критерий улучшения качества управления — уменьшение отклонений угловых скоростей звеньев от программного движения.

Материалы и методы. Рассмотрим кинематическую схему экзоскелета с жесткой конструкцией силового каркаса при симметричном движении ног в сагиттальной плоскости (рис. 1).

[1] Оптимизация времени вертикализации экзоскелета по критерию энергоэффективности / С. Ф. Яцун [и др.] // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины. Курск : Изд-во Юго-Зап. гос. ун-та, 2016. Ч. 2. С. 151–160.

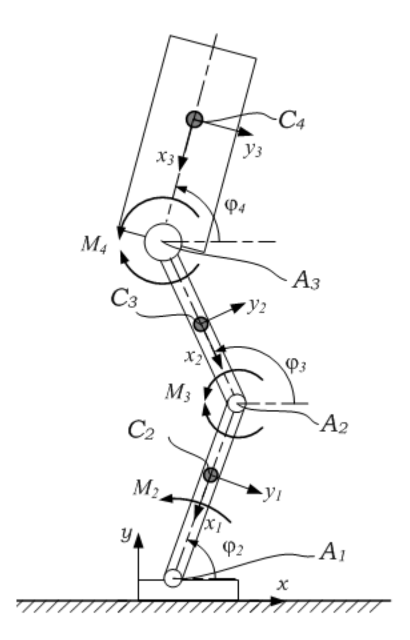


Рис. 1. Кинематическая схема экзоскелета нижних конечностей в сагиттальной плоскости

C_2, C_3, C_4 — центры масс голеней, бедер и корпуса соответственно; A_1, A_2, A_3 — шарниры, соединяющие звенья экзоскелета; φ_2, φ_3, φ_4 — углы поворота звеньев экзоскелета; M_2, M_3, M_4 — управляющие моменты, создаваемые приводами, расположенными в шарнирах A_1, A_2, A_3 соответственно. Для описания движения вводится система координат *xyz*. Ось *x* направлена вдоль опорной поверхности, *y* — вдоль местной вертикали к опорной поверхности. Ось *z* дополняет координатные оси до правой декартовой системы координат.

В качестве основы для построения системы управления движением экзоскелета используем динамическую модель из [6].

$$A(q)\ddot{q} + F(q)\dot{q}^2 + D\dot{q} + P(q) = M. \tag{1}$$

Здесь:

$$A(q) = \begin{pmatrix} J_{22} & J_{23}\cos(\varphi_2-\varphi_3) & J_{24}\cos(\varphi_2-\varphi_4) \\ J_{23}\cos(\varphi_2-\varphi_3) & J_{33} & J_{34}\cos(\varphi_3-\varphi_4) \\ J_{24}\cos(\varphi_2-\varphi_4) & J_{34}\cos(\varphi_3-\varphi_4) & J_{44} \end{pmatrix}$$ — матрица инерционных сил;

$$F(q) = \begin{pmatrix} 0 & J_{23}\sin(\varphi_2-\varphi_3) & J_{24}\sin(\varphi_2-\varphi_4) \\ -J_{23}\sin(\varphi_2-\varphi_3) & 0 & J_{34}\sin(\varphi_3-\varphi_4) \\ -J_{24}\sin(\varphi_2-\varphi_4) & -J_{34}\sin(\varphi_3-\varphi_4) & 0 \end{pmatrix}$$ — матрица скоростных сил;

$D = \mathrm{diag}(\mu_2, \mu_3, \mu_4)$ — диагональная матрица диссипативных сил, характеризующих линейное трение в шарнирах; $P(q) = (M_{G2}\cos\varphi_2 \quad M_{G3}\cos\varphi_3 \quad M_{G4}\cos\varphi_4)^T$ — вектор-столбец моментов, возникающих от действия сил тяжести; $M = (M_2 - M_3 \quad M_3 - M_4 \quad M_4)^T$ — вектор-столбец управляющих моментов, создаваемых приводами, которые расположены в шарнирах звеньев экзоскелета; $q = (\varphi_2 \quad \varphi_3 \quad \varphi_4)^T$ — вектор-столбец обобщенных координат, состоящий из углов поворота звеньев экзоскелета; $J_{jk}\,(j,k = 2,3,4)$ — моменты инерции звеньев экзоскелета; $\mu_k\,(k = 2,3,4)$ — коэффициенты линейного трения в шарнирах звеньев экзоскелета; $M_{Gk}\,(k = 2,3,4)$ — максимальные величины моментов гравитационных сил, воспринимаемые выходными звеньями приводов.

Пусть заданы законы изменения углов и их производные при программном движении:

$$\varphi_i^P = \varphi_i^P(t), \quad \dot{\varphi}_i^P = \dot{\varphi}_i^P(t), \quad \ddot{\varphi}_i^P = \ddot{\varphi}_i^P(t). \quad (i = 2,3,4). \tag{2}$$

Для управления движением экзоскелета предлагается формировать управляющие воздействия в виде суммы управляющих моментов:

– при программном управлении $M_i^P = M_i\left(\varphi_i^P, \dot{\varphi}_i^P, \ddot{\varphi}_i^P\right) \quad (i = 2,3,4)$;

– ПИД регулятора $M_i^{PID} = M_i\left(\varphi_i^P - \varphi_i, \dot\varphi_i^P - \dot\varphi_i, \ddot\varphi_i^P - \ddot\varphi_i\right), (i = 2,3,4)$.

$$M_2 = M_2^P + M_2^{PID}, \quad M_3 = M_3^P + M_3^{PID}, \quad M_4 = M_4^P + M_4^{PID}. \tag{3}$$

Для программного управления значения управляющих воздействий M_i^P можно рассчитать по формулам [7]:

$$\begin{aligned}
M_4^P &= M_{G4}\cos\varphi_4^P + \mu_4\dot\varphi_4^P + J_4\ddot\varphi_4^P + J_{24}\left[\ddot\varphi_2^P\cos\left(\varphi_2^P - \varphi_4^P\right) - \left(\dot\varphi_2^P\right)^2\sin\left(\varphi_2^P - \varphi_4^P\right)\right] + \\
&+ J_{34}\left[\ddot\varphi_3^P\cos\left(\varphi_3^P - \varphi_4^P\right) - \left(\dot\varphi_3^P\right)^2\sin\left(\varphi_3^P - \varphi_4^P\right)\right], \\
M_3^P &= M_{G3}\cos\varphi_3^P + \mu_3\dot\varphi_3^P + J_3\ddot\varphi_3^P + J_{23}\left[\ddot\varphi_2^P\cos\left(\varphi_2^P - \varphi_3^P\right) - \left(\dot\varphi_2^P\right)^2\sin\left(\varphi_2^P - \varphi_3^P\right)\right] + \\
&+ J_{34}\left[\ddot\varphi_4^P\cos\left(\varphi_3^P - \varphi_4^P\right) + \left(\dot\varphi_4^P\right)^2\sin\left(\varphi_3^P - \varphi_4^P\right)\right] + M_4^P, \\
M_2^P &= M_{G2}\cos\varphi_2^P + \mu_2\dot\varphi_2^P + J_2\ddot\varphi_2^P + J_{23}\left[\ddot\varphi_3^P\cos\left(\varphi_2^P - \varphi_3^P\right) + \left(\dot\varphi_3^P\right)^2\sin\left(\varphi_2^P - \varphi_3^P\right)\right] + \\
&+ J_{24}\left[\ddot\varphi_4^P\cos\left(\varphi_2^P - \varphi_4^P\right) + \left(\dot\varphi_4^P\right)^2\sin\left(\varphi_2^P - \varphi_4^P\right)\right] + M_3^P.
\end{aligned} \tag{4}$$

Величины M_i^{PID} вычисляются по принципу обратной связи (в форме ПИД регулятора):

$$\begin{aligned}
M_4^{PID} &= K_{D4}\frac{d}{dt}\left(\dot\varphi_4^P - \dot\varphi_4\right) + K_{P4}\left(\dot\varphi_4^P - \dot\varphi_4\right) + K_{I4}\int_0^t\left(\dot\varphi_4^P(t_1) - \dot\varphi_4(t_1)\right)dt_1, \\
M_3^{PID} &= K_{D3}\frac{d}{dt}\left(\dot\varphi_3^P - \dot\varphi_3\right) + K_{P3}\left(\dot\varphi_3^P - \dot\varphi_3\right) + K_{I3}\int_0^t\left(\dot\varphi_3^P(t_1) - \dot\varphi_3(t_1)\right)dt_1 + M_4^{PID}, \\
M_2^{PID} &= K_{D2}\frac{d}{dt}\left(\dot\varphi_2^P - \dot\varphi_2\right) + K_{P2}\left(\dot\varphi_2^P - \dot\varphi_2\right) + K_{I2}\int_0^t\left(\dot\varphi_2^P(t_1) - \dot\varphi_2(t_1)\right)dt_1 + M_3^{PID},
\end{aligned} \tag{5}$$

или

$$\begin{aligned}
M_4^{PID} &= K_{D4}\left(\ddot\varphi_4^P - \ddot\varphi_4\right) + K_{P4}\left(\dot\varphi_4^P - \dot\varphi_4\right) + K_{I4}\left(\varphi_4^P - \varphi_4\right), \\
M_3^{PID} &= K_{D3}\left(\ddot\varphi_3^P - \ddot\varphi_3\right) + K_{P3}\left(\dot\varphi_3^P - \dot\varphi_3\right) + K_{I3}\left(\varphi_3^P - \varphi_3\right) + M_4^{PID}, \\
M_2^{PID} &= K_{D2}\left(\ddot\varphi_2^P - \ddot\varphi_2\right) + K_{P2}\left(\dot\varphi_2^P - \dot\varphi_2\right) + K_{I2}\left(\varphi_2^P - \varphi_2\right) + M_3^{PID}.
\end{aligned} \tag{6}$$

Здесь коэффициенты ПИД регулятора K_{Pi}, K_{it}, K_{Di} (i = 2, 3, 4) могут быть:

– постоянными (их находят из условий устойчивости);

– функциями времени (находят из решения задач оптимального управления) [9, 13].

Одна из проблем формирования управляющих воздействий в виде ПИД регулятора — возможные погрешности при дифференцировании измерительной информации. Чтобы их избежать, используем:

– энкодеры (для измерения текущих углов поворота φ_i звеньев экзоскелета);

– блоки инерциальных датчиков из микромеханических гироскопов (для измерения угловых скоростей $\dot\varphi_i$) и акселерометров (для оценки угловых скоростей $\dot\varphi_i$ и ускорений $\ddot\varphi_i$).

Модель измерений углов поворота с помощью энкодеров можно представить в виде:

$$\varphi_{E2} = \varphi_2, \quad \varphi_{E3} + \varphi_{E2} = \varphi_3, \quad \varphi_{E4} + \varphi_{E3} + \varphi_{E2} = \varphi_4, \tag{7}$$

где $\varphi_{E2}, \varphi_{E3}, \varphi_{E4}$ — показания энкодеров, расположенных в шарнирах A_1, A_2, A_3 (рис. 1).

Модель измерений угловых скоростей с помощью микромеханических гироскопов можно записать в виде:

$$\Omega_{G2} = \dot\varphi_2, \quad \Omega_{G3} = \dot\varphi_3, \quad \Omega_{G4} = \dot\varphi_4, \tag{8}$$

где Ω_{G2}, Ω_{G3}, Ω_{G4} — показания гироскопов, закрепленных на звеньях экзоскелета.

Для оценки угловых скоростей и ускорений с помощью акселерометров можно использовать по два двухосевых акселерометра, которые расположены на противоположных концах каждого из звеньев. Они измеряют в проекциях на оси $x_i y_i$ (i = 1, 2, 3) кажущиеся ускорения, связанные с соответствующими звеньями.

$$
\begin{aligned}
&f_{A_1A_2}^{A_2} - f_{A_1A_2}^{A_1} = \left(\left(f_{A_1A_2}^{A_2} - f_{A_1A_2}^{A_1} \right)_{x_1} \quad \left(f_{A_1A_2}^{A_2} - f_{A_1A_2}^{A_1} \right)_{y_1} \right)^T = \left(l_1\dot{\varphi}_2^2 \quad -l_1\ddot{\varphi}_2 \right)^T, \\
&f_{A_2A_3}^{A_3} - f_{A_2A_3}^{A_2} = \left(\left(f_{A_2A_3}^{A_3} - f_{A_2A_3}^{A_2} \right)_{x_2} \quad \left(f_{A_2A_3}^{A_3} - f_{A_2A_3}^{A_2} \right)_{y_2} \right)^T = \left(l_2\dot{\varphi}_3^2 \quad -l_2\ddot{\varphi}_3 \right)^T, \\
&f_{A_3C}^{C} - f_{A_3C}^{A_3} = \left(\left(f_{A_3C}^{C} - f_{A_3C}^{A_3} \right)_{x_3} \quad \left(f_{A_3C}^{C} - f_{A_3C}^{A_3} \right)_{y_3} \right)^T = \left(l_3\dot{\varphi}_4^2 \quad -l_3\ddot{\varphi}_4 \right)^T.
\end{aligned}
\tag{9}
$$

Здесь $f_{A_1A_2}^{A_1}, f_{A_1A_2}^{A_2}$ — векторы показаний двухосевых акселерометров, закрепленных на звене A_1A_2 и расположенных в точках A_1 и A_2 соответственно; $f_{A_2A_3}^{A_2}, f_{A_2A_3}^{A_3}$ — векторы показаний двухосевых акселерометров, закрепленных на звене A_2A_3 и расположенных в точках A_2 и A_3 соответственно; $f_{A_3C}^{A_3}, f_{A_3C}^{C}$ — векторы показаний двухосевых акселерометров, закрепленных на звене A_3C и расположенных в точках A_3 и C соответственно; $l_1 = |A_1A_2|, l_2 = |A_2A_3|, l_3 = |A_3C|$ — расстояния между парами акселерометров, закрепленных на звеньях A_1A_2, A_2A_3 и A_3C соответственно.

Объединим уравнения (7)–(9) и запишем формулы для оценки углов поворота, угловых скоростей и ускорений:

$$
\begin{aligned}
&\varphi_2 = \varphi_{E2}, \quad \varphi_3 = \varphi_{E3} + \varphi_{E2}, \quad \varphi_4 = \varphi_{E4} + \varphi_{E3} + \varphi_{E2}, \quad \dot{\varphi}_2 = \Omega_{G2}, \quad \dot{\varphi}_3 = \Omega_{G3}, \quad \dot{\varphi}_4 = \Omega_{G4}, \\
&\ddot{\varphi}_2 = -\frac{\left(f_{A_1A_2}^{A_2} - f_{A_1A_2}^{A_1} \right)_{y_1}}{l_1}, \quad \ddot{\varphi}_3 = -\frac{\left(f_{A_2A_3}^{A_3} - f_{A_2A_3}^{A_2} \right)_{y_2}}{l_2}, \quad \ddot{\varphi}_4 = -\frac{\left(f_{A_3C}^{C} - f_{A_3C}^{A_3} \right)_{y_3}}{l_3}.
\end{aligned}
\tag{10}
$$

Для коррекции оценок модулей угловых скоростей можно использовать уравнения:

$$
\left(f_{A_1A_2}^{A_2} - f_{A_1A_2}^{A_1} \right)_{x_1} = l_1\dot{\varphi}_2^2, \quad \left(f_{A_2A_3}^{A_3} - f_{A_2A_3}^{A_2} \right)_{x_2} = l_2\dot{\varphi}_3^2, \quad \left(f_{A_3C}^{C} - f_{A_3C}^{A_3} \right)_{x_3} = l_3\dot{\varphi}_4^2. \tag{11}
$$

Таким образом, для оценки углов поворота, угловых скоростей и угловых ускорений звеньев экзоскелета можно обработать измерения фильтром скользящего среднего, алгоритмом фильтра Калмана и др. [10, 13, 15].

В самом простом варианте замыкания цепи обратной связи при формировании управления получим выражения для управляющих моментов:

$$
\begin{aligned}
&M_4 = M_4^P + K_{D4}\left(\ddot{\varphi}_4^P + \frac{\left(f_{A_3C}^{C} - f_{A_3C}^{A_3} \right)_{y_3}}{l_3} \right) + K_{P4}\left(\dot{\varphi}_4^P - \Omega_{G4} \right) + K_{I4}\left(\varphi_4^P - \varphi_{E4} - \varphi_{E3} - \varphi_{E2} \right), \\
&M_3 = M_3^P + K_{D3}\left(\ddot{\varphi}_3^P + \frac{\left(f_{A_2A_3}^{A_3} - f_{A_2A_3}^{A_2} \right)_{y_2}}{l_2} \right) + K_{P3}\left(\dot{\varphi}_3^P - \Omega_{G3} \right) + K_{I3}\left(\varphi_3^P - \varphi_{E3} - \varphi_{E2} \right) + M_4^{PID}, \\
&M_2 = M_2^P + K_{D2}\left(\ddot{\varphi}_2^P + \frac{\left(f_{A_1A_2}^{A_2} - f_{A_1A_2}^{A_1} \right)_{y_1}}{l_1} \right) + K_{P2}\left(\dot{\varphi}_2^P - \Omega_{G2} \right) + K_{I2}\left(\varphi_2^P - \varphi_{E2} \right) + M_3^{PID}.
\end{aligned}
\tag{12}
$$

Введение в систему управления обратной связи по угловым ускорениям позволяет применить диагонализацию матрицы инерционных сил для снижения перекрестного влияния между обобщенными координатами.

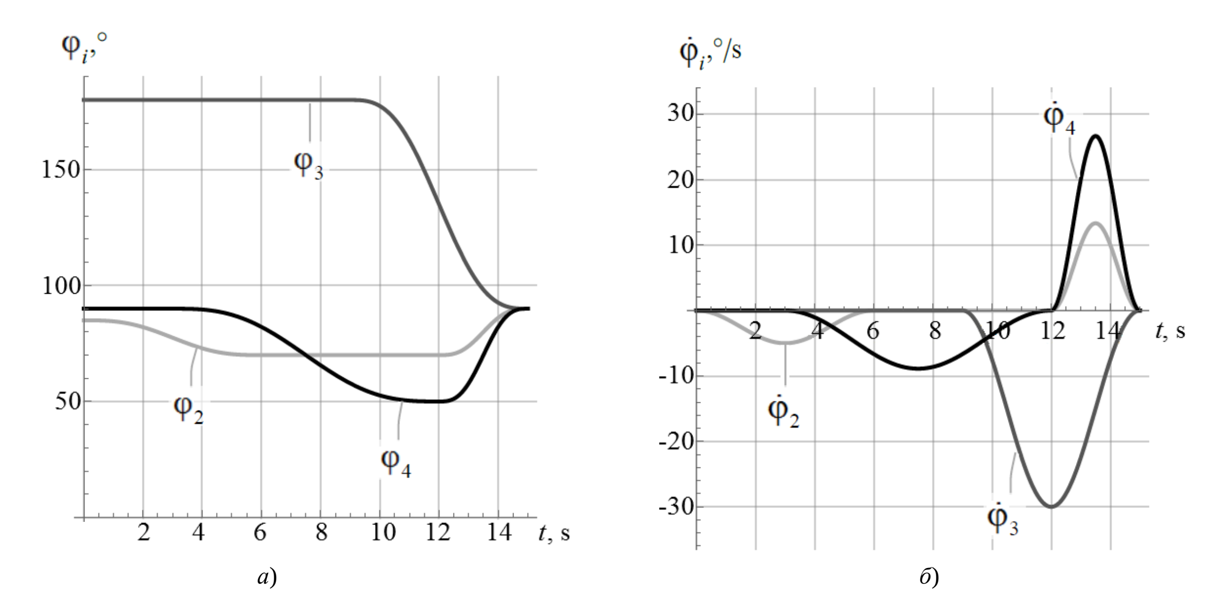
Смоделируем движения экзоскелета для проверки работоспособности предложенного закона управления. В качестве программного движения рассмотрим:

– смену положения из сидячего в стоячее [7];

– стабилизацию вертикального положения экзоскелета при начальных отклонениях звеньев от вертикали.

Результаты исследования. Для численного моделирования системы возьмем параметры математической модели экзоскелета из [6, 7]. Рассмотрим частный случай, выбрав одинаковые коэффициенты ПИД регулятора для каждого привода: $K_{Pi} = 1000$ Н·м·с, $K_{Ii} = 1000$ Н·м, $K_{Di} = 0$ Н·м/с $(i = 2,3,4)$.

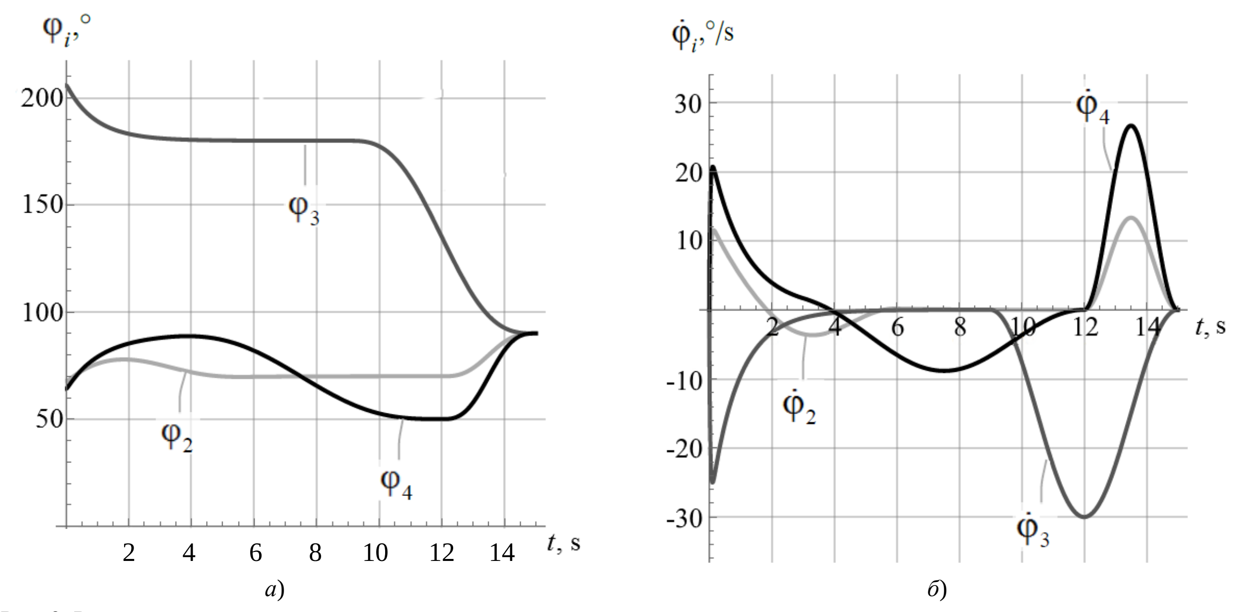
На рис. 2 приведены зависимости от времени для углов поворота и угловых скоростей звеньев экзоскелета. Их получили при управляющих моментах, соответствующих подъему из положения сидя. Как видно из рис. 2 *а*, по окончании движения углы поворота каждого звена равны $\varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4 = 90°$, что соответствует стоянию.



а) *б*)

Рис. 2. Результаты моделирования подъема из положение сидя без начальных отклонений от программного движения в углах поворота звеньев экзоскелета: *а* — углы поворота звеньев; *б* — угловые скорости звеньев

Теперь рассмотрим случай с отклонениями около 20° в углах поворота звеньев по сравнению с начальным положением, заданным в программном движении. Результаты моделирования подъема из положения сидя приведены на рис. 3. Как и на рис. 2, по окончании времени движения значения углов поворота равны $\varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4 = 90°$. Следовательно, использование комбинации программного управления и управления в виде ПИД регулятора точно приводит экзоскелет к требуемому положению.



а) *б*)

Рис. 3. Результаты моделирования подъема из положения сидя при начальных отклонениях от программного движения в углах поворота звеньев экзоскелета: *а* — углы поворота звеньев; *б* — угловые скорости звеньев

Таким образом, при моделировании программного движения показана работоспособность предложенного закона формирования управляющих воздействий, описанного в (4) и (12).

Вертикальное положение экзоскелета неустойчиво без управления, поэтому возмущающие факторы могут обусловить отклонения от равновесия вплоть до падения экзоскелета.

Проверим работоспособность предложенного управления в задаче стабилизации вертикального положения экзоскелета. Значения для программного движения: $\varphi_2^d(t) = \varphi_3^d(t) = \varphi_4^d(t) = 90°$. Рассмотрим случай, когда в углах поворота звеньев есть отклонения около 20° от вертикального положения (рис. 4).

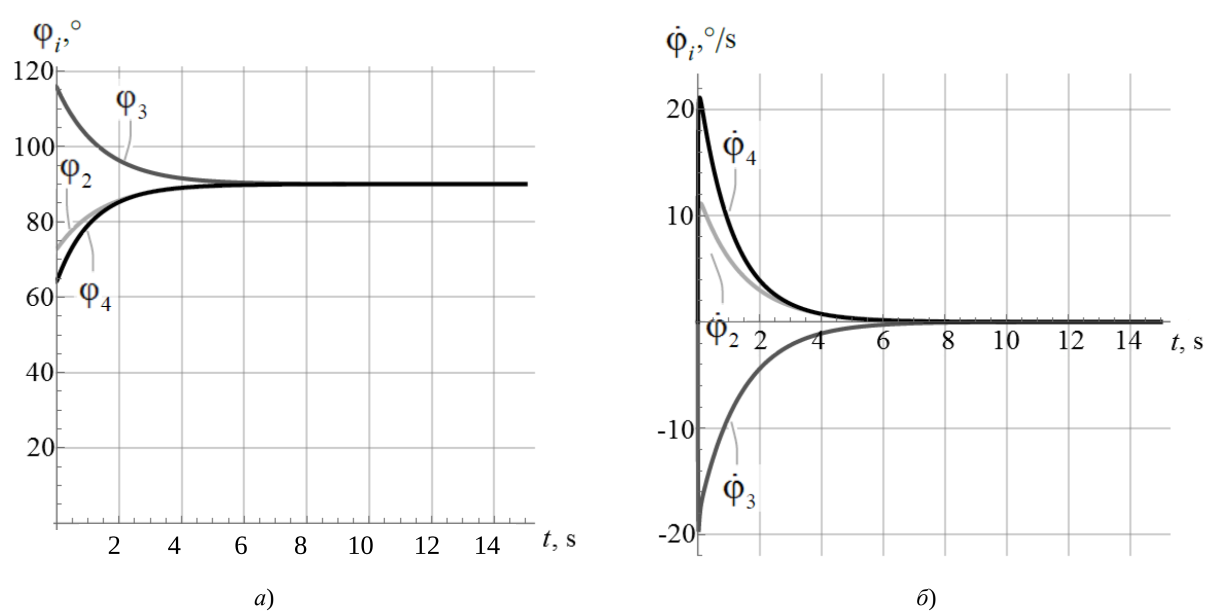


Рис. 4. Результаты моделирования стабилизации вертикального положения при начальных отклонениях от программного движения в углах поворота звеньев экзоскелета: *а* — углы поворота звеньев; б — угловые скорости звеньев

Из рис. 4 видно, что предложенное управление обеспечивает стабилизацию вертикального положения звеньев экзоскелета.

Для сравнения приведем результаты моделирования стабилизации вертикального положения при использовании следующих значений коэффициентов ПИД регулятора: $\mathrm{K_{Pi}} = 1000\ \mathrm{Н \cdot м \cdot с}$, $\mathrm{K_{Ii}} = 1000\ \mathrm{Н \cdot м}$, $\mathrm{K_{Di}} = 100\ \mathrm{Н \cdot м/с}\ (\mathrm{i} = 2, 3, 4)$ (рис. 5).

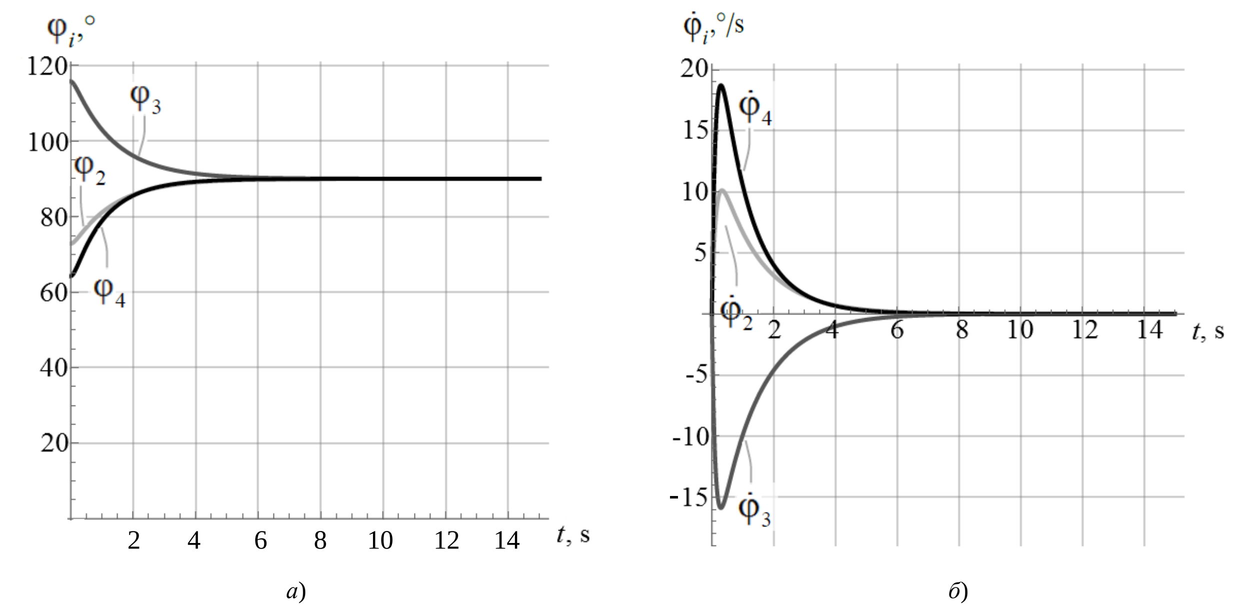


Рис. 5. Результаты моделирования стабилизации вертикального положения при начальных отклонениях от программного движения в углах поворота звеньев экзоскелета: *а* — углы поворота звеньев; *б* — угловые скорости звеньев

Из рис. 5 видно, что при использовании дифференциального звена ($\mathrm{K_{Di}} \neq 0$) регулятора можно снизить выбросы в зависимостях угловых скоростей звеньев экзоскелета по сравнению со случаем $\mathrm{K_{Di}} = 0$ (рис. 4 *б*).

Итак, рассмотрена возможность управления звеньями экзоскелета нижних конечностей с использованием показаний энкодеров и блоков инерциальных датчиков (микромеханических гироскопов и акселерометров). Результаты моделирования доказывают действенность данного подхода.

Обсуждение и заключения. Предлагаемое решение задачи управления движением экзоскелета может быть использовано в медицинских приложениях, в том числе для вертикализации пациентов с нарушениями функций опорно-двигательного аппарата.

Итак, данные блоков инерциальных датчиков можно использовать в задаче оценивания состояния звеньев экзоскелета — их угловых скоростей и ускорений. При этом нет необходимости в численном

дифференцировании измерительной информации энкодеров. Таким образом, в систему управления можно вводить обратную связь по угловым ускорениям, что позволяет улучшать переходные процессы при управлении движением экзоскелета.

Список литературы

1. Exoskeletons for Industrial Application and Their Potential Effects on Physical Work Load / M. P. De Looze, T. Bosch, F. Krause [et al.] // Ergonomics. — 2015. — Vol. 59. — P. 671–681. https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988

2. Геворкян, А. А. Роботизированная механотерапия: возможность применения экзоскелета для нижних конечностей у пациентов с нарушением функции ходьбы при рассеянном склерозе / А. А. Геворкян, С. В. Котов, В. Ю. Лиждвой // Альманах клинической медицины. — 2020. — Т. 48, № 1. — С. 7–12.

3. Экзоскелет — состояние проблемы и перспективы внедрения в систему абилитации и реабилитации инвалидов (аналитический обзор) / А. А. Воробьев, О. А. Засыпкина, П. С. Кривоножкина [и др.] // Вестник Волгоградского государственного медицинского университета. — 2015. — Вып. 2 (54). — С. 9–17.

4. Трехзвенная математическая модель для задачи стабилизации вертикальной позы человека / И. В. Новожилов, А. В. Терехов, А. В. Забелин [и др.] // Математическое моделирование движений человека в норме и при некоторых видах патологии. — Москва : Изд-во механико-математического факультета МГУ. — 2005. — С. 7–20.

5. Моделирование процессов вставания экзоскелета из положения сидя / С. И. Савин, С. Ф. Яцун, А. С. Яцун, Г. Я. Пановко // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2016. — Т. 3. — С. 19–24.

6. Saypulaev, M. R. Development of the Lower Extremity Exoskeleton Dynamics Model Using in the Task of the Patient Verticalization / M. R. Saypulaev, Yu. Yu. Zuev, G. R. Saypulaev // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2096. — Art. 0120421. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2096/1/012042

7. Zuev, Yu. Yu. Laws of Motion of the Lower Extremities and Structural-parametric Synthesis of Electro-Hydraulic Executive Modules of the Active Exoskeleton According to the Criterion of Energy Sufficiency / Yu. Yu. Zuev, M. R. Saypulaev, V. Doni // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2096. — Art. 012044. 10.1088/1742-6596/2096/1/012044

8. Яцун, С. Ф. Определение параметров приводов биоинженерных мехатронных модулей для экзоскелета нижних конечностей человека / С. Ф. Яцун, А. Н. Рукавицин // Известия Юго-Западного государственного университета. — 2012. — Т. 2, № 1. — С. 196–200.

9. Savin, S. I. Energy-Efficient Algorithm of Control of Exoskeleton Verticalization / S. I. Savin, A. S. Yatsun, S. F. Yatsun // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2017. — Vol. 46. — P. 512–517.

10. A Robust Adaptive-Fuzzy-Proportional-Derivative Controller for a Rehabilitation Lower Limb Exoskeleton / N. Aliman, R. Ramli, S. M. Haris [et al.] // International Journal of Engineering Science and Technology. — 2022. — Vol. 35. — Art. 101097. 10.1016/j.jestch.2022.101097

11. Adaptive Particle Swarm Optimization of PID Gain Tuning for Lower-Limb Human Exoskeleton in Virtual Environment / M. S. Amiri, R. Ramli, M. F. Ibrahim [et al.] // Mathematics. — 2020. — Vol. 8. — Art. 2040. 10.3390/math8112040

12. Development and Control of an Electro-Hydraulic Actuator System for an Exoskeleton Robot / Dongyoung Lee, Buchun Song, Sang Yong Park, Yoon Su Baek // Applied Sciences. — 2019. — Vol. 9. — Art. 4295. 10.3390/app9204295

13. Lora-Millan, J. S. An IMUs-Based Extended Kalman Filter to Estimate Gait Lower Limb Sagittal Kinematics for the Control of Wearable Robotic Devices / J. S. Lora-Millan, A. F. Hidalgo, E. Rocon // IEEE Access. — 2021. — Vol. 9. — P. 144540–144554. 10.1109/ACCESS.2021.3122160

14. Minimizing Human-Exoskeleton Interaction Force by Using Global Fast Sliding Mode Control / Duong Mien Ka, Cheng Hong, Tran Huu Toan, Jing Qiu // International Journal of Control, Automation and Systems. — 2016. — Vol. 14. — P. 1064–1073. 10.1007/s12555-014-0395-7

15. Балакришнан, А. В. Теория фильтрации Калмана / А. В. Балакришнан. — Москва : Книга по требованию. — 2021. — 164 с.

Поступила в редакцию 11.07.2022
Поступила после рецензирования 01.08.2022
Принята к публикации 10.08.2022

Об авторах:

Сайпулаев Гасан Русланович, аспирант и ассистент кафедры «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, РФ, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), ScopusID, ORCID, saypulaevgr@mail.ru

Сайпулаев Муса Русланович, аспирант кафедры «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, РФ, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), ScopusID, ORCID, saypulaevmr@mail.ru

Меркурьев Игорь Владимирович, заведующий кафедрой «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, РФ, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), доктор технических наук, доцент, ScopusID, ORCID, nir4s@ya.ru

Адамов Борис Игоревич, доцент кафедры «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, РФ, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), кандидат физико-математических наук, доцент, ScopusID, ORCID, adamoff.b@yandex.ru

Гарсиа Ройлан Бельо, аспирант кафедры «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин» Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, РФ, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), ORCID, roilangarcia76@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

Г. Р. Сайпулаев — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов. М. Р. Сайпулаев — формирование математической модели, проведение расчетов, подготовка текста. И. В. Меркурьев — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. Б. И. Адамов — формирование основной концепции исследования научное руководство, анализ результатов исследований, корректировка выводов. Р. Б. Гарсиа — проведение расчетов, подготовка текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МЕХАНИКА
MECHANICS







УДК 539.3
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-214-223

Научная статья



Критические нагрузки равномерно сжатой ортотропной прямоугольной пластины на упругом основании

И. М. Пешхоев, **Б. В. Соболь**
Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ peshkhoev@rambler.ru

Аннотация

Введение. Рассматривается задача о критических нагрузках сжатой ортотропной прямоугольной пластины на упругом основании. Для пластины заданы параметры ортотропии: коэффициенты Пуассона, модули Юнга для главных направлений и модуль сдвига материала пластины. Составляющие сжимающей нагрузки равномерно распределены по двум противоположным краям пластины и действуют параллельно осям координат. Края пластины свободно защемлены или шарнирно оперты. Рассмотрены также случаи, когда два параллельных края пластины свободны от нагрузок, а два других свободно защемлены или шарнирно оперты.

Материалы и методы. Задача рассматривается на основе системы нелинейных уравнений равновесия типа Кармана. Критические значения параметра нагрузки определяются из линеаризованной на тривиальном решении задачи. При этом для решения краевой задачи на собственные значения применяется вариационный метод в сочетании с конечно-разностным методом.

Результаты исследования. Задача сведена к решению параметрической линейной краевой задачи на собственные значения. В случае краевых условий подвижного шарнирного опирания приведены точные формулы собственных значений и собственных функций, а в случае свободного защемления краев применен вариационный метод в сочетании с конечно-разностным методом и построена компьютерная программа решения задачи. Установлено, что критическому значению параметра сжимающей нагрузки, при котором происходит потеря устойчивости сжатой пластины, может соответствовать одна или две собственные функции, выражающие прогиб пластины. Приведены результаты численных расчетов критических значений сжимающей нагрузки при различных значениях параметров ортотропии и построены графики соответствующих форм равновесия. Для случая длинной ортотропной пластины на упругом основании установлено, что главный член асимптотического разложения решения линейной задачи на собственные значения определяется из задачи о критических нагрузках сжатой балки на упругом основании с модулем упругости, совпадающим с модулем упругости пластины по продольному направлению.

Обсуждение и заключения. Исследована задача о критических нагрузках сжатой в двух направлениях ортотропной пластины, лежащей на упругом основании. При повышении составляющей сжимающей нагрузки вдоль одного направления снижается величина критического значения нагрузки, сжимающей пластину вдоль другого направления. Если ортотропная пластина сжимается нагрузкой вдоль направления, которое соответствует большей изгибной жесткости, то критическое значение потери устойчивости больше, чем критическое значение действующей вдоль направления меньшей изгибной жесткости сжимающей нагрузки. Наличие упругого основания повышает несущую способность сжатой пластины.

Ключевые слова: критическая нагрузка, упругая ортотропная пластина, устойчивость равновесия, упругое основание, параметрическая краевая задача на собственные значения.

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов, а также выражают признательность редакции журнала «Advanced Engineering Research» за помощь, оказанную в процессе подготовки статьи.

Для цитирования. Пешхоев, И. М. Критические нагрузки равномерно сжатой ортотропной прямоугольной пластины на упругом основании / И. М. Пешхоев, Б. В. Соболь // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 3. — С. 214–223. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-214-223

Original article

Critical Loads of Uniformly Compressed Orthotropic Rectangular Plate on an Elastic Base

Isa M. Peshkhoev ✉, **Boris V. Sobol**
Don State Technical University, 1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ peshkhoev@rambler.ru

Abstract

Introduction. The problem of critical loads of a compressed orthotropic rectangular plate on an elastic base was considered. The following orthotropy parameters were set for the plate: Poisson coefficients, Young's modules for the main directions, and the shear modulus of the plate material. The components of the compressive load were uniformly distributed along two opposite edges of the plate and acted parallel to the coordinate axes. The edges of the plate were loosely pinched or pivotally supported. Cases were also considered when two parallel edges of the plate were free from loads, and the other two were freely pinched or pivotally supported.

Materials and Methods. The problem was studied on the basis of a system of nonlinear Kármán-type equilibrium equations. The critical values of the load parameter were determined from a linearized problem based on a trivial solution. At the same time, the variational method in combination with the finite difference method was used to solve the boundary eigenvalue problem.

Results. The problem was reduced to solving a parametric linear boundary eigenvalue problem. In case of boundary conditions of a movable hinge support, exact formulas of eigenvalues and eigenfunctions were given. While in case of free edge pinching, a variational method was used in combination with a finite-difference method, and a computer program for solving the problem was built. It was established that one or two eigenfunctions expressing the deflection of the plate could correspond to the critical value of the compressive load parameter at which the stability of the compressed plate was lost. The results of numerical calculations of the critical values of the compressive load at different values of the orthotropy parameters were presented, and graphs of the corresponding equilibrium forms were constructed. For the case of a long orthotropic plate on an elastic base, it was established that the main term of the asymptotic expansion of the solution to the linear eigenvalue problem was determined from the problem of critical loads of a compressed beam on an elastic base with an elastic modulus that coincides with the elastic modulus of the plate in the longitudinal direction.

Discussion and Conclusions. The problem of critical loads of an orthotropic plate compressed in two directions lying on an elastic base was investigated. As the compressive load component increased along one direction, the critical value of the load compressing the plate along the other direction decreased. If an orthotropic plate was compressed by a load along a direction that corresponded to a greater bending stiffness, then the critical value of the loss of stability was greater than the critical value of the compressive load acting along the direction of a lesser bending stiffness. The presence of an elastic foundation increased the bearing capacity of the compressed plate.

Keywords: critical load, elastic orthotropic plate, equilibrium stability, elastic base, parametric eigenvalue boundary problem.

Acknowledgments. The authors would like to thank the reviewers, and express their gratitude to the editorial board of the journal “Advanced Engineering Research” for the assistance provided in the process of preparing the article.

For citation. I. M. Peshkhoev, B. V. Sobol. Critical Loads of Uniformly Compressed Orthotropic Rectangular Plate on an Elastic Base. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 214–223. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-214-223

Введение. Л. М. Зубов в работе [1] вывел уравнения равновесия упругой пластинки, содержащей источники внутренних напряжений в виде дислокаций и дисклинаций, являющиеся модификацией уравнений Кармана. В этой работе также решена задача об изгибе тонкой пластинки (мембраны) под действием внутренних напряжений, обусловленных дефектами. В работах [2–5] теория дислокаций и дисклинаций применяется в исследовании поведения пластин и оболочек. В статье [6] построено общее решение уравнения колебаний прямоугольной ортотропной пластины со свободными краями. В работах [7, 8] строятся асимптотические решения задач статики и динамики узких пластин.

В работе [9] рассмотрена задача о ветвлении равновесий под влиянием малого нормального давления сжатой в одном направлении прямоугольной пластины, содержащей дислокации и дисклинации. Рассмотрен случай, когда продольные края пластины свободны от нагрузок, а два других края закреплены. В [10] для задачи о критических нагрузках сжатой узкой пластины строится асимптотическое решение с помощью разложения по малому параметру относительной ширины пластины. В [11] исследована задача о ветвлении равновесий упругой прямоугольной пластины с внутренними источниками напряжений для случая, когда сжимающие нагрузки неравномерно распределены по краям. Установлено, что при четных формах функции несовместности и четных формах распределения по краям сжимающих усилий наличие малой нормальной нагрузки не снижает несущую способность пластины.

В работе Морозова Н. Ф., Беляева А. К., Товстика П. Е., Товстик Т. П. [12] представлен асимптотический вывод двумерных уравнений равновесия тонкой упругой неоднородной пластины, изготовленной из анизотропного материала общего вида. В [13] сформулированы выводы о формах потери устойчивости сжатой пластины на упругом мягком основании. В работе [14] исследована жесткость на изгиб тонкой упругой многослойной пластины с трансверсально изотропными слоями. Проводится сравнение двух моделей учета влияния поперечного сдвига.

В работе [15] построена модель термоупруговязкопластической деформации композита, который перекрестно армирован непрерывными волокнами в произвольных направлениях.

В [16] в рамках прямого подхода к теории пластин рассматривается задача о гиперупругой пластине с неоднородно распределенными начальными напряжениями. Пластина рассматривается как материальная поверхность с пятью степенями свободы (три перемещения и два вращения). В работе [17] в рамках нелинейной упругости анализируется устойчивость равномерно сжатой круглой двухслойной пластины с первоначально сжатым или растянутым слоем. Для определяющего соотношения материала используется модель несжимаемого неогуковского материала. Представлен анализ зависимости результирующих критических напряжений от начальных деформаций и параметров жесткости. В работе [18] исследуется изгиб трехслойной пластины, содержащей поверхностные и межфазные напряжения, рассмотрена теория пластин с деформациями сдвига первого порядка и модель поверхностных напряжений Гуртина-Мердока. Анализируется зависимость параметров жесткости пластины от модулей поверхностной упругости. В работе [19] рассматривается задача о неустойчивости трехслойной нелинейно-упругой прямоугольной пластины с предварительно напряженным средним слоем.

В настоящей работе исследуется влияние параметров материала пластины и параметра упругого основания на критические нагрузки потери устойчивости сжатой упругой прямоугольной ортотропной пластины на упругом основании.

Материалы и методы. Рассмотрим лежащую на линейно упругом основании ортотропную прямоугольную пластину, которая сжимается усилиями P и Q вдоль осей X и Y. Уравнения равновесия можно записать в виде [7]:

$$\begin{cases} D_1\partial_X^4 W + 2D_3\partial_X^2\partial_Y^2 W + D_2\partial_Y^4 W + KW = [W,F], \\ \dfrac{1}{E_2}\partial_X^4 F + \left(\dfrac{1}{G} - \dfrac{2\nu_1}{E_1}\right)\partial_X^2\partial_Y^2 F + \dfrac{1}{E_1}\partial_Y^4 F = -\dfrac{1}{2}[W,W]. \end{cases} \quad (1)$$

Краевые условия запишем в виде:

$$\begin{cases} W = \partial_X W = 0, \quad \partial_Y\partial_X F = 0, \quad \partial_Y^2 F = -P \text{ при } |X| = a/2, \\ W = \partial_Y W = 0, \quad \partial_Y\partial_X F = 0, \quad \partial_X^2 F = -Q \text{ при } |Y| = b/2. \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} W = \partial_X^2 W = 0, \quad \partial_Y\partial_X F = 0, \quad \partial_Y^2 F = -P \text{ при } |X| = a/2, \\ W = \partial_Y^2 W = 0, \quad \partial_Y\partial_X F = 0, \quad \partial_X^2 F = -Q \text{ при } |Y| = b/2. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} W = \partial_X W = 0, \quad \partial_Y\partial_X F = 0, \quad \partial_Y^2 F = -P \text{ при } |X| = a/2, \\ \partial_Y^2 W + \nu_1\partial_X^2 W = \partial_Y^3 W + (2-\nu_1)\partial_X^2\partial_Y W = \partial_Y\partial_X F = \partial_X^2 F = 0 \text{ при } |Y| = b/2. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} W = \partial_X^2 W = 0, \quad \partial_Y\partial_X F = 0, \quad \partial_Y^2 F = -P \text{ при } |X| = a/2, \\ \partial_Y^2 W + \nu_1\partial_X^2 W = \partial_Y^3 W + (2-\nu_1)\partial_X^2\partial_Y W = \partial_Y\partial_X F = \partial_X^2 F = 0 \text{ при } |Y| = b/2. \end{cases} \quad (5)$$

$[W,F] \equiv \partial_X^2 W \partial_Y^2 F + \partial_Y^2 W \partial_X^2 F - 2\partial_X \partial_Y W \partial_X \partial_Y F$, $D_i = E_i h^3 / \left(12(1-\nu_1\nu_2)\right)$, $i = 1,2$; $D_k = Gh^3/12$, $D_3 = D_1\nu_2 + 2D_k$, $E_1\nu_2 = E_2\nu_1$.

Здесь ν_1, ν_2, E_1, E_2, *G* — коэффициенты Пуассона, модули Юнга для главных направлений и модуль сдвига материала пластины; D_1, D_2 — жесткости изгиба по главным направлениям; D_k — жесткость кручения; функция $W(X,Y)$ выражает прогиб, а $F(X,Y)$ обозначает функцию напряжений; *h* — толщина пластины; KW — реакция основания; *K* — коэффициент постели; начало координат *X, Y* располагается в центре пластины и оси параллельны ее краям; ∂_X^n — частная производная *n*-го порядка по переменной *X*. Мы полагаем, что края пластины свободно защемлены (2) или шарнирно оперты (3). При этом сжимающие усилия *P* и *Q* равномерно распределены по краям $X = \pm a/2$ и $Y = \pm b/2$ соответственно. Рассматриваются также случаи, когда два параллельных края пластины $Y = \pm b/2$ свободны от нагрузок, а два других свободно защемлены (4) или шарнирно оперты (5). В этих случаях сжимающая нагрузка приложена только к краям $X = \pm a/2$.

Положим $F = \Phi - P\frac{Y^2}{2} - Q\frac{X^2}{2}$. Тогда для функции Φ справедливы однородные краевые условия $\Phi_{XY} = \Phi_{YY} = 0$ при $|X| = a/2$, $\Phi_{XY} = \Phi_{XX} = 0$ при $|Y| = b/2$. Эти условия можно заменить на эквивалентные краевые условия $\Phi = \Phi_X = 0$ при $|X| = a/2$, $\Phi = \Phi_Y = 0$ при $|Y| = b/2$. Перейдем к безразмерным переменным по формулам:

$$X = ax;\ Y = by,\ \delta = \frac{b}{a};\ \Phi(X,Y) = D_1 f(x,y);\ W(X,Y) = w(x,y)h;\ K = \frac{kD_1}{b^4};\ P = \frac{pD_1}{b^2};\ Q = \frac{qD_1}{b^2},$$

$$\alpha = 6(1-\nu_1\nu_2);\ 2c_1 = \frac{E_2}{G} - 2\nu_2;\ c_2 = \frac{D_2}{D_1};\ c_3 = \frac{D_3}{D_1}.$$

Тогда систему уравнений (1) и краевые условия (2), (3) можно переписать в виде:

$$\begin{cases} \delta^4 \partial_x^4 w + 2c_3 \delta^2 \partial_x^2 \partial_y^2 w + c_2 \partial_y^4 w + \delta^4 k w = \delta^2 [w,f] - p\delta^2 \partial_x^2 w - q \partial_y^2 w, \\ \delta^4 \partial_x^4 f + 2c_1 \partial_x^2 \partial_y^2 \delta^2 f + c_2 \partial_y^4 f = -\alpha c_2 \delta^2 [w,w]. \end{cases} \quad (6)$$

$$[w, \partial_x w, f, \partial_x f]\big|_{|x|=1/2} = 0;\ [w, \partial_y w, f, \partial_y f]\big|_{|y|=1/2} = 0. \quad (7)$$

$$[w, \partial_x^2 w, f, \partial_x f]\big|_{|x|=1/2} = 0;\ [w, \partial_y^2 w, f, \partial_y f]\big|_{|y|=1/2} = 0. \quad (8)$$

$$[w, \partial_x w, f, \partial_x f]\big|_{|x|=1/2} = 0;\ [\partial_y^2 w + \nu_1 \partial_x^2 w, \partial_y^3 w + (2-\nu_1)\partial_x^2 \partial_y w, f, \partial_y f]\big|_{|y|=1/2} = 0. \quad (9)$$

$$[w, \partial_x^2 w, f, \partial_x f]\big|_{|x|=1/2} = 0;\ [\partial_y^2 w + \nu_1 \partial_x^2 w, \partial_y^3 w + (2-\nu_1)\partial_x^2 \partial_y w, f, \partial_y f]\big|_{|y|=1/2} = 0. \quad (10)$$

При любых значениях параметров *k, p, q* нелинейной краевой задаче (6) с любым из условий (7)–(10) удовлетворяет тривиальное решение $(w_*, f_*) = (0,0)$.

Обозначим через E^2 множество вектор-функций $f = (f_1, f_2)$ с конечной нормой, которая определяется с помощью скалярного произведения:

$$\langle f, g \rangle_{E^2} = \iint_\Omega (f_1 g_1 + f_2 g_2)\,dxdy;\quad f = (f_1, f_2), g = (g_1, g_2). \quad (11)$$

Через E^1 обозначим пространство бесконечно дифференцируемых в области $\Omega = \{(x,y) : |x| < 1/2, |y| < 1/2\}$ вектор-функций $u = (w, F)$; $v = (w_1, F_1)$, которые удовлетворяют на границе $\partial\Omega$ области Ω одному из краевых условий (5) или (6). Норму в E^1 определим с помощью скалярного произведения:

$$\langle u, v \rangle_{E^1} = \sum_{i+j \le 4} \left\langle \frac{\partial^{i+j} u}{\partial x^i \partial y^j}, \frac{\partial^{i+j} v}{\partial x^i \partial y^j} \right\rangle_{E^2}. \quad (12)$$

Краевая задача (6) с одним из краевых условий (7)–(10) может быть рассмотрена как нелинейное операторное уравнение:

$$M_0u = \Pi u, \quad u = \left(w, f\right) \in E^1, \tag{13}$$

где

$$M_0u \equiv \begin{pmatrix} \delta^4\partial_x^4 w + 2c_3\delta^2\partial_x^2\partial_y^2 w + c_2\partial_y^4 w + kw + p\delta^2\partial_x^2 w + q\partial_y^2 w \\ \delta^4\partial_x^4 f + 2c_1\partial_x^2\partial_y^2\delta^2 f + c_2\partial_y^4 f \end{pmatrix}; \ \Pi u \equiv \begin{pmatrix} \delta^2\left[w, f\right] \\ -\alpha c_2\delta^2\left[w, w\right] \end{pmatrix}. \tag{14}$$

Здесь M_0 — линейный, а Π — нелинейный операторы, так как:

$$\left[w, f\right] \equiv \partial_x^2 w\partial_y^2 f + \partial_y^2 w\partial_x^2 f - 2\partial_x\partial_y w\partial_x\partial_y f\ .$$

Из результатов работ И. И. Воровича и Н. Ф. Морозова следует [9], что операторы M_0 и Π действуют из пространства E^1 в E^2. Пусть $k = 0$, $p = 0$, $q = 0$. Тогда уравнение (9) имеет единственное тривиальное решение $u_* = \left(w_*, f_*\right) = \left(0,0\right)$. При малых изменениях величин параметров p, q и k тривиальное решение остается единственным. Если при любых малых значениях числа $\varepsilon > 0$ и фиксированном значении k существуют значения параметров p, q, которые удовлетворяют неравенству $\left|p - p_0\right| + \left|q - q_0\right| < \varepsilon$ и для которых существуют хотя бы два решения уравнения (9), то точку $\left(p_0, q_0,\right)$ называют точкой ветвления (или точкой бифуркации) [9] этого уравнения. В работе [9] показано, что для нахождения точки бифуркации $\left(p_0, q_0\right)$ надо решить краевую задачу на собственные значения, которая представляет собой линеаризованное на тривиальном решении уравнение:

$$M_0u = 0\,. \tag{15}$$

Собственные значения $\left(p_0, q_0\right)$ являются критическими значениями параметров сжимающей нагрузки $\left(p, q\right)$. Учитывая (13) и (14), уравнение (15) можно записать как следующую краевую задачу на собственные значения: найти такие значения параметра *p*, что для фиксированных значений параметра основания (коэффициента постели) *k* и параметра *q* нагрузки вдоль оси *y*, следующая задача имеет нетривиальное решение:

$$\delta^4\partial_x^4 w + 2c_3\delta^2\partial_x^2\partial_y^2 w + c_2\partial_y^4 w + kw + q\partial_y^2 w = -p\delta^2\partial_x^2 w\ , \tag{16}$$

$$\left[w, \partial_x w\right]\Big|_{|x|=1/2} = 0\ ; \ \left[w, \partial_y w\right]\Big|_{|y|=1/2} = 0\,, \tag{17}$$

$$\left[w, \partial_x^2 w\right]\Big|_{|x|=1/2} = 0\,; \left[w, \partial_y^2 w\right]\Big|_{|y|=1/2} = 0\,, \tag{18}$$

$$\left[w, \partial_x w\right]\Big|_{|x|=1/2} = 0\ ; \ \left[\partial_y^2 w + \nu_1\partial_x^2 w, \partial_y^3 w + \left(2 - \nu_1\right)\partial_x^2\partial_y w, f, \partial_y f\right]\Big|_{|y|=1/2} = 0\,, \tag{19}$$

$$\left[w, \partial_x^2 w\right]\Big|_{|x|=1/2} = 0\ ; \left[\partial_y^2 w + \nu_1\partial_x^2 w, \partial_y^3 w + \left(2 - \nu_1\right)\partial_x^2\partial_y w, f, \partial_y f\right]\Big|_{|y|=1/2} = 0\,. \tag{20}$$

При этом критическому значению потери устойчивости сжатой пластины отвечает минимальное собственное значение параметра *p*, а соответствующая этому значению собственная функция показывает форму равновесия после потери устойчивости. Для случая шарнирного опирания краев (18) для уравнения (16) можно записать точные решения:

$$p_{m,n} = \frac{\left(\delta^4 m^4 + 2c_3 m^2 n^2 + c_2 n^4\right)\pi^4 - q\pi^2 n^2 + k}{\pi^2 m^2}\ ; \ w_{m,n} = \sin\pi m\left(x - \frac{1}{2}\right)\sin\pi n\left(y - \frac{1}{2}\right), \tag{21}$$

где *m* и *n* произвольные натуральные числа.

Из анализа формул (21) следует, что при различных отношениях длин краев пластины δ, физических параметров ортотропности материала пластины c_3, c_2, параметра *q* сжимающей нагрузки по оси *y*, и коэффициента постели *k* (характеризующего реакцию основания) критическому значению нагрузки $p_* = \min\limits_{m,n\ >0} p_{m,n}$ может соответствовать одна или несколько полуволн в форме равновесия (21). При этом возможно так называемое выпучивание по двум собственным формам, когда, например, $p_* = \min\limits_{m,n\ >0} p_{m,n} = p_{1,1} = p_{2,1}$. Ниже приводятся такие случаи. Для решения задачи (16) с краевыми условиями свободного защемления краев (17) применяется вариационный метод в сочетании с конечно-разностным методом, который был обоснован в работах [9, 10] и легко переносится на случай ортотропной пластины. При этом разработанная для этой задачи компьютерная программа тестировалась на решении задачи (16), (18).

Кроме этого, разработана компьютерная программа решения вариационным методом в сочетании с конечно-разностным методом задачи (16) с каждым из краевых условий (19), (20). Для этих случаев были сконструированы тестовые примеры соответствующих краевых задач.

В работе [7] в задаче об асимптотическом интегрировании уравнения малых колебаний длинной ($b << a$) прямоугольной ортотропной пластины построено разложение решения по степеням малого параметра $\delta = b/a$ и показано, что главный член разложения определяется из уравнения колебаний балки с модулем упругости $E = E_1$. Повторяя рассуждения работ [7] и [10] будем искать решение задачи (16) с краевыми условиями (19) или (20) в виде рядов:

$$p = \sum_{i=0}^{\infty} p_{2i}\delta^{2i}, \quad w = \sum_{i=0}^{\infty} w_{2i}\delta^{2i}. \tag{22}$$

Можно показать, что главный член асимптотического разложения (22) решения задачи (16) с краевыми условиями (19) или (20) определяется из задачи в безразмерных переменных о критических нагрузках сжатой упругой балки на упругом основании со свободно защемленными или подвижно шарнирно опертыми краями:

$$\left(1-\nu_1^2\right)w_0'''' + kw_0 + p_0 w_0'' = 0, \tag{23}$$

$$w_0 = w_0' = 0, \tag{24}$$

$$w_0 = w_0'' = 0. \tag{25}$$

Здесь штрихом обозначена обыкновенная производная функции, зависящей от переменной x. Можно построить алгоритм определения всех коэффициентов слагаемых разложений (22), но авторы не будут этого делать в данной работе.

При переходе к размерным переменным из (23)–(25) получаем задачу о критических нагрузках сжатой балки с модулем упругости $E = E_1$. Задача на собственные значения (23) с краевыми условиями (25) имеет точное решение:

$$p_m = \pi^2 m^2 + \frac{k}{\pi^2 m^2}; \quad w_m(x) = \sin(\pi m x). \tag{26}$$

В случае краевых условий (24) задача (23) решается вариационно-разностным методом.

Результаты исследования. Проведены численные расчеты критических значений параметра нагрузки p, сжимающей вдоль направления оси x при фиксированных значениях коэффициента постели k, и фиксированных значениях параметра нагрузки q, сжимающей вдоль направления оси y и заданных значениях параметров ортотропии материала пластины. Построены соответствующие критическим нагрузкам формы равновесия пластины.

Пример 1. Рассмотрим пример квадратной ортотропной пластины из работы [16] «фанера первого типа» — трехслойная фанера: если направить ось x вдоль волокон рубашки (верхнего и нижнего из трех слоёв), то модули Юнга вдоль волокон и поперек соответственно равны $E_1 = 1,4\cdot 10^5 \text{кг}/\text{см}^2$ и $E_2 = \frac{1,4}{12}\cdot 10^5 \text{кг}/\text{см}^2$; коэффициенты Пуассона — $\nu_1 = 0,46$ и $\nu_2 = 0,46/12$; модуль сдвига для главных направлений упругости $G = 1,2\cdot 10^5 \text{кг}/\text{см}^2$. Тогда для задачи в безразмерных переменных (16) получим $\delta = \frac{b}{a} = 1$; $c_2 = \frac{D_2}{D_1} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{1}{12} = 0,083$; $c_3 = \frac{D_3}{D_1} = 0,207$ учитывая приведенные выше формулы перехода к безразмерным переменным. Пусть края пластины шарнирно оперты. Тогда из (21) при $k = 0$, $q = 8,193$ следует $p_* = \min_{m,n>0} p_{m,n} = p_{1,1} = p_{1,2} = 6,580$. Этому критическому значению отвечают две формы равновесия $w_{1,1} = \sin\pi\left(x-\frac{1}{2}\right)\sin\pi\left(y-\frac{1}{2}\right)$ и $w_{1,2} = \sin\pi\left(x-\frac{1}{2}\right)\sin 2\pi\left(y-\frac{1}{2}\right)$.

В таблице 1 приведены значения критической нагрузки p^* потери устойчивости ортотропной пластины с защемленными краями, сжатой по оси x, для различных значений коэффициента постели k и различных значениях сжимающей нагрузки по оси y. Таблица 1 показывает, что при повышении значения коэффициента постели критическая нагрузка потери устойчивости сжатой ортотропной пластины также повышается.

Таблица 1

Зависимость критической нагрузки p^* от параметра основания k при различных q

	p^*		
k	q = 0	q = 10	q = 20
0	47,455	38,011	5,298
1000	112,142	105,841	88,1469
2000	146,99	144,252	122,039
3000	164,809	163,198	141,578
4000	177,741	176.455	175,106
5000	189,002	187,843	186,65

Пример 2. Рассмотрим ту же ортотропную пластину из примера 1 и направим ось x поперек волокон рубашки. Тогда модули Юнга вдоль осей x и y соответственно равны $E_1 = \frac{1,4}{12} \cdot 10^5 кг/см^2$; $E_2 = 1,4 \cdot 10^5 кг/см^2$; коэффициенты Пуассона — $\nu_1 = 0,46/12$ и $\nu_2 = 0,46$; модуль сдвига для главных направлений упругости $G = 1,2 \cdot 10^5 кг/см^2$. Тогда для задачи в безразмерных переменных (12) получим $\delta = \frac{b}{a} = 1$; $c_2 = \frac{D_2}{D_1} = \frac{E_2}{E_1} = 12$; $c_3 = \frac{D_3}{D_1} = 2,481$. Пусть выполняются краевые условия (13) — края пластины свободно защемлены. В результате численных расчетов с помощью компьютерной программы решения задачи (12), (13) для данной ортотропной пластины построены зависимости между нагрузкой q по оси y и критическим значением p_* нагрузки p по оси x при фиксированных значениях остальных параметров этой задачи. В таблице 2 приведены значения $(q, p*)$ при $k = 0$.

Таблица 2

Зависимость между q и $p*$ при k = 0

№ пп	1	2	3	4	5	6
q	0	100	200	300	400	500
p*	254,388	241,867	227,789	208,778	166,462	77,105

Отметим, что всем шести точкам $(q, p*)$ отвечает форма равновесия, постепенно трансформирующаяся от вида, представленного на рис. 1 *а*, до вида на рис. 1 *в*. На рис. 1 проиллюстрированы первая, третья и шестая собственные функции, соответствующие критическим точкам $(q, p*)$ таблицы 1. Эти собственные функции показывают формы равновесия пластины после потери устойчивости (формы потери устойчивости).

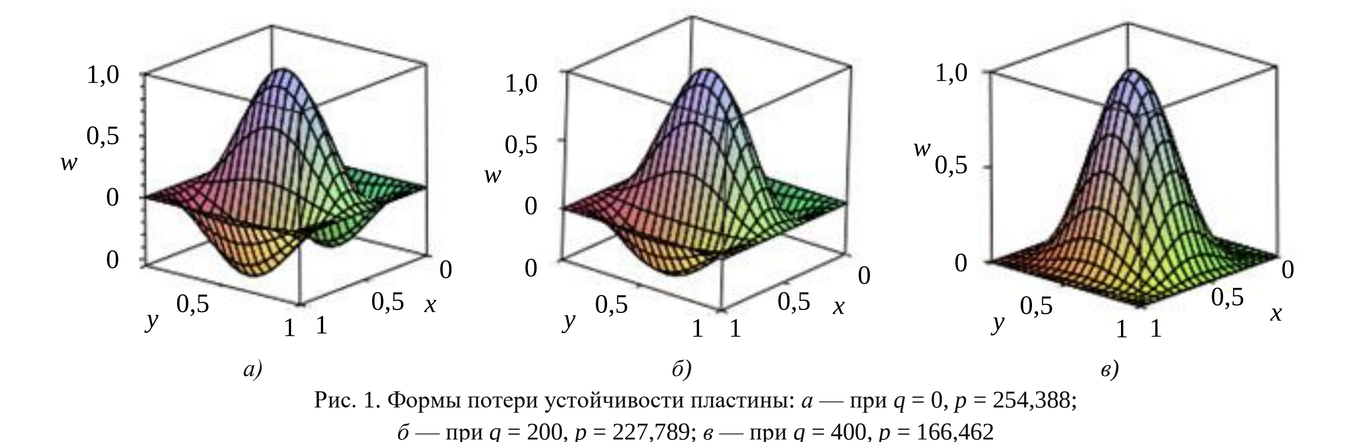
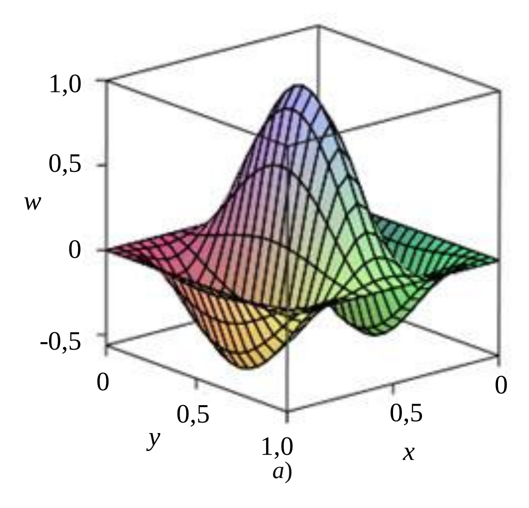
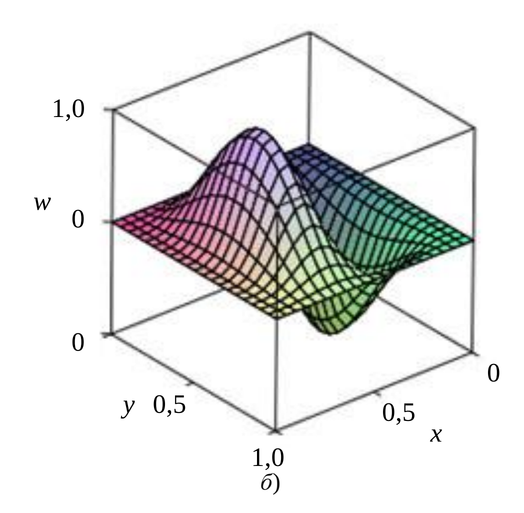


Рис. 1. Формы потери устойчивости пластины: *а* — при q = 0, p = 254,388; *б* — при q = 200, p = 227,789; *в* — при q = 400, p = 166,462

В результате численных расчетов с помощью компьютерной программы решения краевой задачи (16), (17) для данной ортотропной пластины найдены значения параметров $k = 200$; $q = 0$ при которых собственному значению $p^* = 255,6$ отвечают две собственные функции w_1 и w_2. Этот случай соответствует потере устойчивости пластины по двум собственным формам. На рис. 2 представлены графики соответствующих этому случаю форм потери устойчивости.



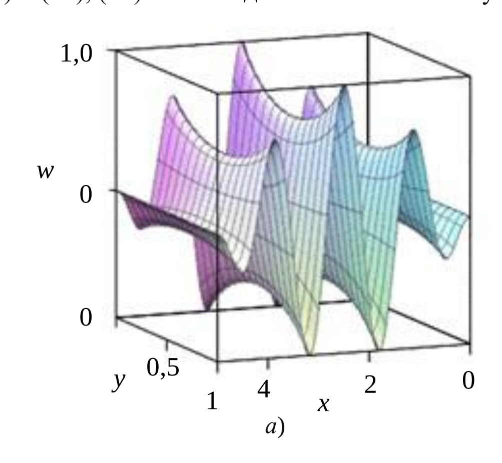
а)



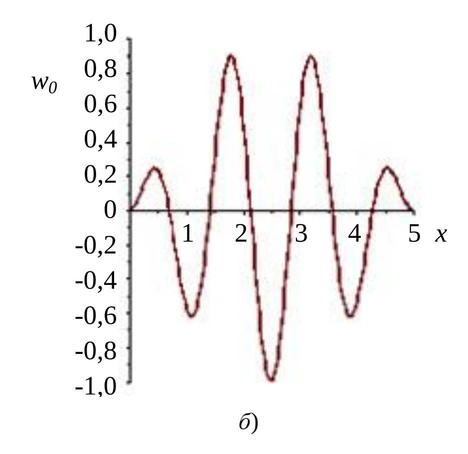
б)

Рис. 2. Две формы потери устойчивости: *а* — w_1; *б* — w_2

Пример 3. Рассмотрим ортотропную пластину с параметрами $E_1 = 1,4 \cdot 10^5 кг/см^2$, $E_2 = \frac{1,4}{12} \cdot 10^5 кг/см^2$; коэффициенты Пуассона — $\nu_1 = 0,46$ и $\nu_2 = 0,46/12$; модуль сдвига для главных направлений упругости $G = 1,2 \cdot 10^5 кг/см^2$. Пусть длина пластины $a = 5$, ширина $b = 1$, края $x = \pm\frac{a}{2}$ — защемлены, а края $y = \pm\frac{b}{2}$ — свободны, параметр $\delta = \frac{1}{5}$ (пластину можно считать длинной), коэффициент постели $k = 350$. Численный расчет решения задачи (16) с краевыми условиями (17) дает значение критической нагрузки $p = 37,42$, график соответствующей собственной функции представлен на рис. 3 *а*. Численный расчет решения задачи (23), (24) при $\nu_1 = 0,46$ и $k = 350$ для балки длиной $a = 5$ дает $p_0 = 39,01$, при этом собственная функция имеет вид, представленный на рис. 3 *б*. Как видим, критическая нагрузка потери устойчивости пластины совпадает с критической нагрузкой балки с погрешностью $|p - p_0| = |37,42 - 39,01| \approx 0,04$. Собственные функции задач (16), (17) и (23), (24) имеют одинаковое число полуволн.



а)



б)

Рис. 3. Формы потери устойчивости: *а* — $w(x, y)$, сжатой ортотропной длинной пластины; *б* — $w_0(x)$, сжатой балки

Обсуждение и заключения. Исследована задача о критических нагрузках сжатой в двух направлениях ортотропной пластины, лежащей на упругом основании. Задача сведена к решению параметрической линейной краевой задачи на собственные значения. В случае краевых условий подвижного шарнирного опирания

приведены точные формулы собственных значений и собственных функций, а в случае свободного защемления краев применен вариационный метод в сочетании с конечно-разностным методом и построена компьютерная программа решения задачи. Получены следующие выводы:

1. При повышении составляющей сжимающей нагрузки q вдоль оси y снижается величина критического значения p^* нагрузки, сжимающей пластину вдоль оси x.

2. Если ортотропная пластина сжимается нагрузкой вдоль направления, которое соответствует большей изгибной жесткости, то критическое значение потери устойчивости больше, чем критическое значение действующей вдоль направления меньшей изгибной жесткости сжимающей нагрузки.

3. При наличии упругого основания большему значению коэффициента постели $k > 0$ соответствует большее значение критического значения сжимающей нагрузки. Наличие упругого основания повышает несущую способность сжатой пластины.

4. В случае длинной ортотропной пластины на упругом основании критическую нагрузку сжатой пластины можно вычислять приближенно как критическую нагрузку сжатой балки на упругом основании с модулем упругости, равным модулю упругости пластины в продольном направлении.

Список литературы

1. Зубов, Л. М. Уравнения Кармана для упругой пластинки с дислокациями и дисклинациями / Л. М. Зубов // Доклады академии наук. — 2007. — Т. 412. — С. 343–346.

2. Zubov, L. M. The Linear Theory of Dislocation and Disclinations in Elastic Shells / L. M. Zubov // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. — 2010. — Vol. 74. — P. 663–672. https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2011.01.006

3. Зубов, Л. М. Теория дислокаций и дисклинаций в упругих пластинках / Л. М. Зубов, А. В. Столповский // Прикладная математика и механика. — 2008. — Т. 72. — С. 996–1013.

4. Зубов, Л. М. Сильный изгиб круглой пластинки с непрерывно распределенными дисклинациями / Л. М. Зубов, Фам Тан Хунг // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. — 2010. — № 4 (158). — С. 28–33.

5. Зубов, Л. М. Осесимметричнный изгиб нелинейно упругой кольцевой пластики с распределенными дисклинациями / Л. М. Зубов, Т. Х. Фам // Экологический вестник научных центров ЧЭС. — 2010. — № 4. — С. 36–43.

6. Папков, С. О. Колебания прямоугольной ортотропной пластины со свободными краями: анализ и решение бесконечной системы / С. О. Папков // Акустический журнал. — 2015. — Т. 61. — С. 152–160. https://doi.org/10.7868/S0320791915010086

7. Столяр, А. М. Поведение узких панелей и сферических оболочек в условиях статического и динамического нагружения. Асимптотический и численный анализ: монография / А. М. Столяр. — Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета, 2014. — 146 с.

8. Finiukova, V. O. Asymptotic Integration of One Narrow Plate Problem / V. O. Finiukova, A. M. Stolyar // In book: Shell-like Structures. Non-Classical Theories and Applications. Advanced Structured Materials Series. — 2011. — Vol. 15. — P. 53–62. Springer-Verlag: Berlin – Heidelberg.

9. Пешхоев, И. М. Выпучивание сжатой упругой прямоугольной пластины со свободными краями / И. М. Пешхоев, Б. В. Соболь // Проблемы прочности и пластичности. — 2020. — Т. 82. — С. 244–251. https://doi.org/10.32326/1814-9146-2020-82-2-244-251

10. Пешхоев, И. М. Асимптотика критических нагрузок сжатой узкой упругой пластины с внутренними напряжениями / И. М. Пешхоев // Проблемы прочности и пластичности. — 2021. — Т. 82. — С. 227–234. https://doi.org/10.32326/1814-9146-2021-83-2-227-234

11. Peshkhoev, I. M. Buckling of the Nonuniformly Compressed Plate with Dislocations and Disclinations / I. M. Peshkhoev, A. M. Stolyar // In book: Analysis of Shells, Plates, and Beams. Advanced Structured Materials Series. — 2020. — Vol. 134. — P. 345–366. Springer, Cham. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-47491-1_18

12. Two-dimensional linear models of multilayered anisotropic plates / A. K. Belyaev, N. F. Morozov, P. E. Tovstik, T. P. Tovstik // Acta Mechanica. — 2019. — Vol. 230. — P. 2891–2904. https://doi.org/10.1007/s00707-019-02405-y

13. Морозов, Н. Ф. О формах потери устойчивости сжатой пластины на упругом основании / Н. Ф. Морозов, П. Е. Товстик // Доклады академии наук. — 2012. — Т. 446. — С. 37–41.

14. Морозов, Н. Ф. Изгибная жесткость многослойных пластин / Н. Ф. Морозов, П. Е. Товстик, Т. П. Товстик // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. — 2020. — № 5. — С. 7–12. https://doi.org/10.31857/S0572329920050128

15. Янковский, А. П. Моделирование термоупруговязкопластического деформирования гибких армированных пластин / А. П. Янковский // Прикладная математика и механика. — 2022. — Т. 86. — С. 121–150. https://doi.org/10.31857/S003282352201009X

16. Altenbach, H. On the Effective Stiffness of Plates Made of Hyperelastic Materials with Initial Stresses / H. Altenbach, V. A. Eremeyev // International Journal of Non-Linear Mechanics. — 2010. — Vol. 45. — P. 976–981. https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2010.04.007

17. Eremeev, V. V. Buckling of a Two-Layered Circular Plate with a Prestressed Layer / V. V. Eremeev, L. M. Zubov // Mathematics and Mechanics of Solids. — 2017. — Vol. 22. — P. 773–781. https://doi.org/10.1177/1081286515612527

18. Altenbach, H. Bending of a Three-Layered Plate with Surface Stresses / H. Altenbach, V. A. Eremeyev // In book: Analysis and Modelling of Advanced Structures and Smart Systems. Advanced Structured Materials Series. — 2018. — Vol. 81. — P. 1–10. Springer: Singapore. https://doi.org/10.1007/978 – 981-10 – 6895-9_1

19. Eremeev, V. V. On Instability of Three-Layered Nonlinear Elastic Rectangular Plate with Prestressed Middle Layer / V. V. Eremeev, L. M. Zubov // In book: Shell Structures: Theory and Applications. — 2018. — Vol. 4. — P. 215–218. London: CRC Press, Taylor and Francis Group.

Поступила в редакцию 01.07.2022
Поступила после рецензирования 25.07.2022
Принята к публикации 01.08.2022

Об авторах:

Пешхоев Иса Мусаевич, доцент кафедры «Информационные технологии» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID, peshkhoev@rambler.ru

Соболь Борис Владимирович, заведующий кафедрой «Информационные технологии» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID, b.sobol@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

И. М. Пешхоев — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов. Б. В. Соболь — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МЕХАНИКА
MECHANICS







УДК 539.3

Научная статья

https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-224-231



Микротвердость и динамический предел текучести медных образцов при ударе по жесткой стенке

Н. В. Пахнутова[1,2] ✉, **Е. Н. Боянгин**[1], **О. А. Шкода**[1], **С. А. Зелепугин**[1,2]

[1]Национальный исследовательский Томский государственный университет, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, 36

[2]Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Российская Федерация, г. Томск, пр. Академический, 10/4

✉ nadin_04@mail.ru

Аннотация

Введение. Одним из часто применяемых методов для оценки динамических характеристик материала является тест Тейлора, который устанавливает связь динамического предела текучести материала цилиндрического образца с его длиной после удара по недеформируемой преграде. Целью данной работы является исследование микротвердости и определение динамического предела текучести медных образцов для различных скоростей удара в тесте Тейлора.

Материалы и методы. Эксперименты проводились с образцами из меди (М1) цилиндрической формы. На баллистическом стенде были подобраны условия метания, которые обеспечивали на выходе из ствола скорость движения образца в диапазоне 150–450 м/с. После удара измерялась микротвердость образцов в плоскости разреза. Расчет динамического предела текучести проводили по классической формуле Тейлора.

Результаты исследования. Представлены экспериментальные данные для медных образцов цилиндрической формы при ударе по жесткой стенке со скоростями в диапазоне 162–416 м/с, включая конфигурации и размеры образцов до и после удара. Получены распределения микротвердости в осевом сечении образцов. Для каждого образца были построены зависимости усредненных значений микротвердости, которые позволили выделить четыре области деформирования образцов (область упругих деформаций, пластических деформаций, интенсивных пластических деформаций, область материала, подвергающегося разрушению) и определить их размеры. Рассчитан динамический предел текучести меди в исследованном диапазоне скоростей удара.

Обсуждение и заключения. Значения микротвердости во всей рассматриваемой области и для всех исследованных скоростей удара превышают исходное значение. Имеет место существенное увеличение значения динамического предела текучести по сравнению с его статическим значением. Выявлена корреляция максимальных усредненных значений микротвердости и динамического предела текучести, которые возрастают с ростом скорости удара.

Ключевые слова: тест Тейлора, медный цилиндр, высокоскоростной удар, микротвердость, деформирование, динамический предел текучести.

Благодарности. Авторы благодарят Ю. Ф. Христенко, доктора технических наук, ведущего научного сотрудника НИИПММ ТГУ (Томск) за помощь в проведении экспериментов. Авторы выражают признательность рецензентам.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ТНЦ СО РАН, проект № 121031800149–2.

Для цитирования. Микротвердость и динамический предел текучести медных образцов при ударе по жесткой стенке / Н. В. Пахнутова, Е. Н. Боянгин, О. А. Шкода, С. А. Зелепугин // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 3. — С. 224–231. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-224-231

Original article

Microhardness and Dynamic Yield Strength of Copper Samples upon Impact on a Rigid Wall

Nadezhda V. Pakhnutova[1,2] ✉, **Evgeniy N. Boyangin**[2], **Olga A. Shkoda**[2], **Sergey A. Zelepugin**[1,2]

[1]National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, Russian Federation

[2]Tomsk Scientific Center, Siberian Branch, RAS, 10/4, Akademichesky Av., Tomsk, Russian Federation

✉nadin_04@mail.ru

Abstract

Introduction. One of the commonly used methods for assessing the dynamic characteristics of a material is the Taylor test, which establishes the relationship between the dynamic yield strength of a cylindrical sample material and its length after hitting a non-deformable barrier. The purpose of this work was to study the microhardness and determine the dynamic yield strength of copper samples for various impact velocities in the Taylor test.

Materials and Methods. Experiments were carried out with cylindrical copper (M1) samples. The throwing conditions were selected on the ballistic stand, which provided the speed of the sample in the range of 150–450 m/s at the exit from the barrel. After the impact, the microhardness of the samples in the section plane was measured. The calculation of the dynamic yield strength was carried out according to the classical Taylor formula.

Results. Experimental data are presented for cylindrical copper samples upon impact on a rigid wall with velocities in the range of 162–416 m/s, including configurations and sizes of images before and after impact. Microhardness distributions in the axial section of the samples were obtained. For each sample, the dependences of the averaged values of microhardness were constructed, which made it possible to identify four areas of deformation of the samples (the area of elastic deformations, plastic deformations, intense plastic deformations, the area of the material undergoing destruction) and determine their sizes. The dynamic yield strength of copper in the studied range of impact velocities was calculated.

Discussion and Conclusions. The values of microhardness in the entire considered region and for all studied impact velocities exceeded the initial value. There was a significant increase in the value of the dynamic yield strength compared to its static value. The correlation of the maximum averaged values of microhardness and dynamic yield strength, which grew with increasing impact velocity, was identified.

Keywords: Taylor test, copper cylinder, high-speed impact, microhardness, deformation, dynamic yield strength.

Acknowledgments. The authors would like to thank Yu. F. Khristenko, Dr.Sci (Engineering), leading researcher of the Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk State University (Tomsk), for his assistance in conducting experiments. The authors express their gratitude to reviewers.

Funding information. The research is done within the frame of the government task from Tomsk Scientific Center, Siberian Branch, RAS (no. 121031800149–2).

For citation. N. V. Pakhnutova, E. N. Boyangin, O. A. Shkoda, S. A. Zelepugin. Microhardness and Dynamic Yield Strength of Copper Samples upon Impact on a Rigid Wall. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 224–231. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-224-231

Введение. Развитие в научно-технических областях, связанных с динамическим нагружением тел, во многом зависит от создания новых материалов с заданными свойствами. Это явилось толчком для активных экспериментальных, аналитических и численных исследований, связанных с динамическим нагружением деформируемых твердых тел [1–4].

Одним из часто применяемых методов для оценки динамических характеристик материала является тест (метод, задача) Тейлора. Метод Тейлора устанавливает связь динамического предела текучести материала цилиндрического образца с его длиной после удара по недеформируемой преграде (жесткой стенке). Данный

подход часто используется для определения динамического предела текучести новых материалов [5–8], а также для выбора определяющих соотношений и подбора констант при численном моделировании [9–14].

Для ускорения тел с заданной формой применяются легкогазовые установки (ЛГУ). Эти установки дают возможность получить скорость метания до 7–9 км/с, в отдельных экспериментах до 11 км/с, благодаря чему получили широкое применение в газодинамике, баллистике, материаловедении и т. д. В НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета разработана одноступенчатая легкогазовая установка [15], в которой образец ускоряется сжатым газом (гелием), подаваемым из баллона. Она была использована для проведения экспериментов по методу Тейлора, представленных в этой работе.

Целью данной работы является исследование микротвердости и определение динамического предела текучести медных образцов для различных скоростей удара в тесте Тейлора.

Материалы и методы. Эксперимент проводился с образцами из меди (М1) цилиндрической формы длиной 34,5 мм, диаметром 7,8 мм, массой около 15 г. Состав материала образца указан в таблице 1.

Таблица 1

Состав меди (М1)

Cu	Ag	Fe	Ni	S	As	Pb	O	Sb	Bi	Sn
> 99,9	<0,003	< 0,005	< 0,002	< 0,004	< 0,002	< 0,005	< 0,05	< 0,002	< 0,001	< 0,002

На баллистическом стенде были подобраны условия метания, которые обеспечивали на выходе из ствола скорость движения образца в диапазоне 150–450 м/с. Подбор условий был необходим, так как обычно для подобных экспериментов используются образцы существенно меньшей массы, которые метаются со значительно большей начальной скоростью. С помощью адаптации начальных условий и оборудования получилось обеспечить стабильное метание медного цилиндра с заданной скоростью. После эксперимента образцы были разрезаны на две равные части вдоль оси симметрии при помощи станка с ЧПУ DK7732 для электроэрозионной резки.

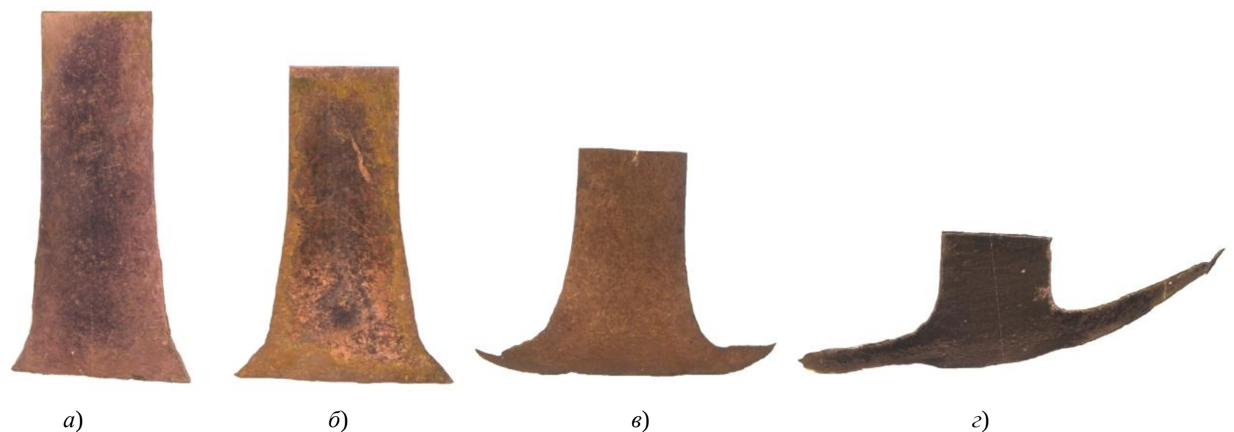
Микротвердость измерялась в плоскости разреза вдоль осевой линии образцов на твердомере ПТМ–3 согласно ГОСТ 9650–76 вдавливанием алмазных наконечников. Погрешность измерений данного прибора составляет 2 %. Значения микротвердости были рассчитаны также согласно ГОСТ 9650–76.

Расчет динамического предела текучести σ проводили по классической формуле Тейлора:

$$\sigma = \frac{\rho \upsilon^2 (L_0 - L_e)}{2(L_0 - L)\ln(\dfrac{L_0}{L_e})},$$

где ρ — плотность материала; υ — скорость удара; L_0 — начальная длина; L — конечная длина после соударения; L_e — длина упругой части образца. В данной формуле основными показателями являются длина упругой части образца и конечная длина цилиндра после удара.

Результаты исследования. *Микротвердость.* На рис. 1 продемонстрированы сечения медных образцов после удара с различными начальными скоростями. Для всех образцов имеет место область упругого деформирования с конечным диаметром, равным начальному, в том числе и для скорости 416 м/с. Упругая область переходит в пластическую, что сопровождается деформированием, в том числе в радиальном направлении, и, соответственно, ростом конечного диаметра. Ближе к контактной поверхности наблюдается зона интенсивных пластических деформаций, переходящая в зону разрушения материала цилиндра. Также присутствует незначительная асимметрия деформирования образцов, обусловленная особенностями метания, что может создавать некоторые трудности для прямого сравнения результатов экспериментов с численным моделированием при использовании оси симметрии или плоскости симметрии в постановке задачи.



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 1. Сечения медных образцов после удара с различными начальными скоростями:
а — 162 м/с; *б* — 225 м/с; *в* — 316 м/с; *г* — 416 м/с

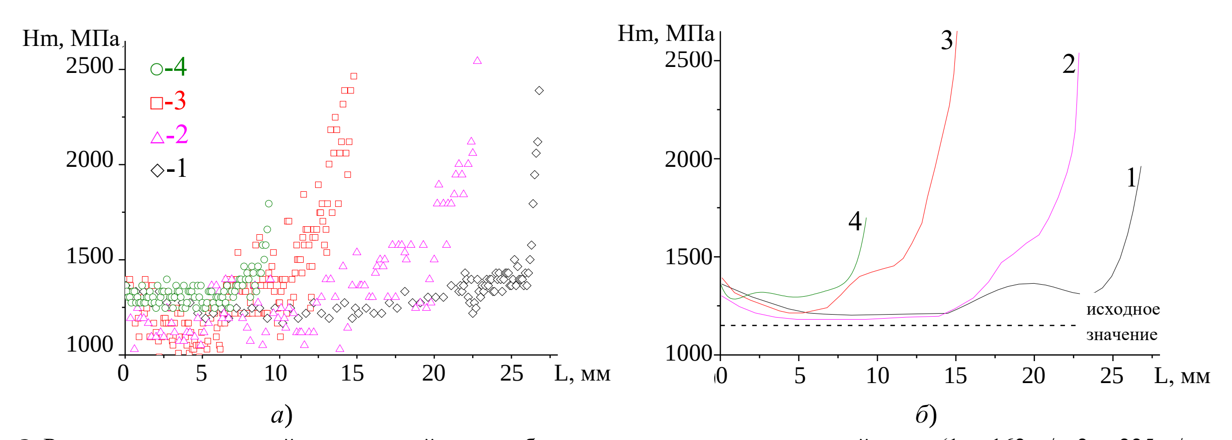


Рис. 2. Распределение значений вдоль осевой линии образцов для различных скоростей удара (1— 162 м/с, 2— 225 м/с, 3— 316 м/с, 4—416 м/с): *а* — микротвердости; *б* — рассчитанное осредненное распределение микротвердости

В исходном состоянии измеренное среднее значение микротвердости составляет 1150±100 МПа. Такой разброс значений, по-видимому, происходит из-за структурных особенностей материала и наличия в структуре неоднородностей. Рис. 2 *а* показывает распределение значений микротвердости вдоль осевой линии образца для различных скоростей удара, на рис. 2 *б* представлены результаты осреднения полученных значений.

Сравнивая средние значения микротвердости с величиной в недеформируемом образце (1150 МПа), получаем, что микротвердость во всей рассматриваемой области превышает исходное значение. Можно выделить несколько зон деформирования. Это тыльная область образца, где происходит незначительное увеличение микротвердости до значений 1250–1350 МПа, связанное, по-видимому, с воздействием давления газов при метании. В средней части микротвердость приближается к показателям недеформированных образцов. Далее, ближе к границе контакта, микротвердость начинает расти до значений 1400–1600 МПа с выходом на точку перегиба, после чего наблюдается резкий рост микротвердости до 1800–2700 МПа.

Максимальная микротвердость наблюдается при скорости удара, равной 316 м/с, при более высоких скоростях на рис. 2 наблюдается резкое снижение величины микротвердости. Падение микротвердости в образце для скорости удара 416 м/с обусловлено его разрушением в области удара и потерей части материала цилиндра в виде осколков.

Рассмотрим подробнее образец со скоростью удара 316 м/с. Для данного образца было сделано две серии измерений вдоль двух линий, которые условно названы C и C1. Расположение данных линий выбиралось из следующих соображений. Линия C располагалась вдоль оси симметрии, а линия C1 проходила через середину радиуса сечения образца. Во время измерений микротвердости вдоль каждой линии было сделано свыше 100 измерений. Данный массив значений микротвердости был осреднен, результат осреднения представлен на рис. 3.

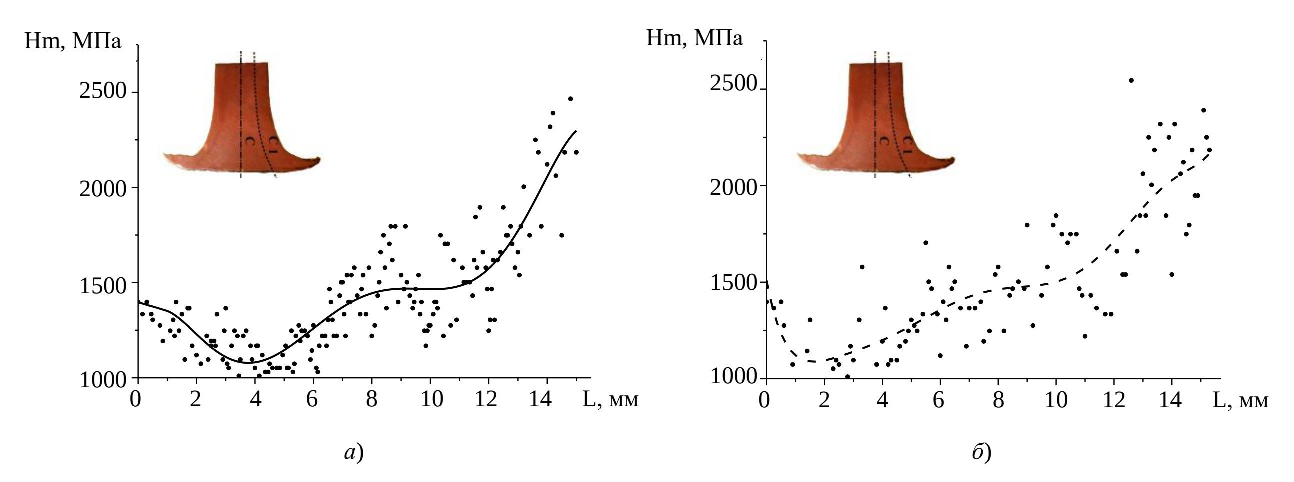


Рис. 3. Осредненное распределение микротвердости медного образца при скорости удара 316 м/с вдоль линий: *а* — С; *б* — С1

На рис. 3 видно, что обе кривые имеют нелинейный характер, причем распределение микротвердости в обоих случаях качественно подобны и количественно близки. Такие данные позволяют выделить области деформирования образцов и определить их размеры.

Области деформирования цилиндрических образцов. Предлагается рассмотреть схему деформирования цилиндрического образца, представленную на рис. 4 и включающую 4 области, размер которых определяется на основе анализа распределения микротвердости.

Зона 1 соответствует области упругих деформаций; 2 — пластических; 3 — интенсивных пластических деформаций; 4 — область материала; подвергающегося разрушению. В таблице 1 представлены размеры данных областей образцов в зависимости от скорости соударения, где υ — скорость удара; L — конечная длина после соударения; L_e — длина зоны упругих деформаций; L_p — длина зоны пластических деформаций; L_{ipf} — длина зоны интенсивных пластических деформаций; L_f — длина зоны разрушений; D_1 — диаметр тыльного торца цилиндра; D_2 — диаметр контактной границы.

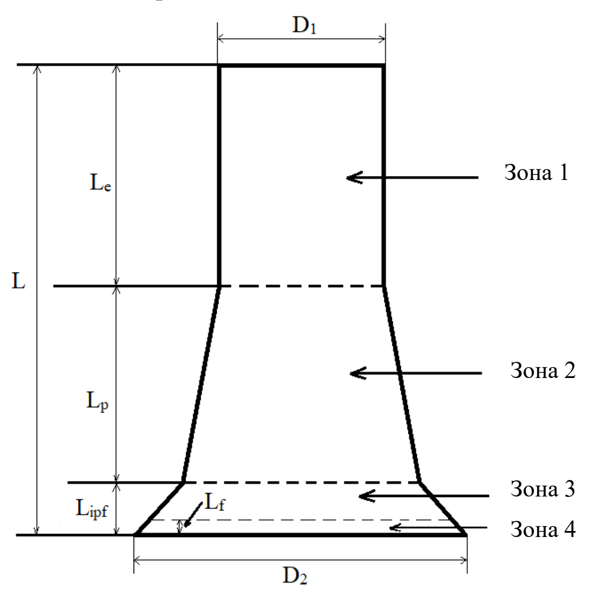


Рис. 4. Схема деформирования образца после соударения с жесткой стенкой

Таблица 2

Геометрические размеры областей деформирования образцов

υ, м/с	L, мм	L_e, мм	L_p, мм	L_{ipf}, мм	L_f, мм	D_1, мм	D_2, мм
0	34,5	0	0	0	0	7,8	7,8
162	26,1	12,34	10,63	3,13	0	7,8	12,7
225	22,5	9,78	9,51	3,21	0,93	7,8	15,8
316	16,1	5,87	6,83	3,4	1,14	7,9	21,4
416	9,3	3,5	1,38	4,42	2,01	7,9	31,28

Данные, приведенные в таблице 2, показывают, что у образца при скорости удара 162 м/с отсутствует зона разрушения материала, полученный образец является примером классического теста Тейлора, который в дальнейшем может быть использован для создания адекватной численной модели удара цилиндрического образца о жесткую преграду и подбора констант моделей материала. У образцов при скорости 225 и 316 м/с проявляются все 4 зоны, но по сравнению с образцом при скорости удара 416 м/с, зона разрушения мала. У цилиндра со скоростью удара 416 м/с после теста практически отсутствует зона пластической деформации, при данной скорости удара зона упругой деформации быстро переходит в зону интенсивных пластических деформаций, совмещенную с зоной разрушения.

Динамический предел текучести. Результаты расчета динамического предела текучести σ представлены на рис. 5 *а*. Значение скорости 416 м/с не было принято во внимание, так как в данном случае разрушение цилиндра значительное, что не позволяет применить данную методику расчета. Статический предел текучести меди М1 составляет 0,1 ГПа. Имеет место существенное увеличение значения динамического предела текучести по сравнению с его статическим значением, также наблюдается рост динамического предела текучести с ростом скорости удара.

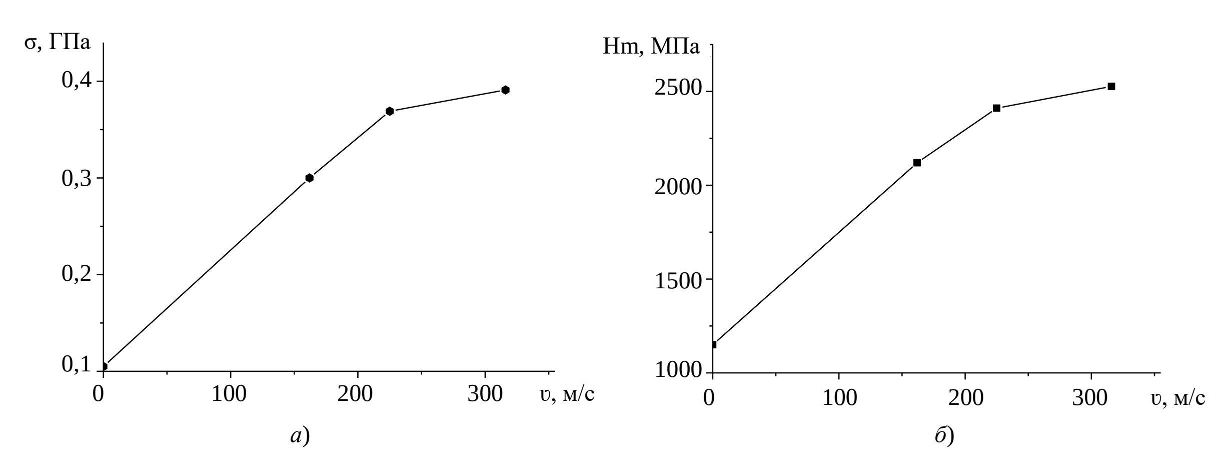


Рис. 5. Зависимости от скорости удара: *а* — динамического предела текучести и *б* — максимальной микротвердости

Рис. 5 *б* демонстрирует зависимость максимальной микротвердости образцов от скорости удара. Графики на рис. 5 *а* и 5 *б* качественно подобны, что предполагает корреляцию динамического предела текучести и максимальной микротвердости и возможность их взаимного пересчета.

Обсуждение и заключения. Представлены результаты экспериментов теста Тейлора для цилиндрических медных образцов в диапазоне скоростей удара 162–416 м/с. Полученные данные показывают, что после удара цилиндра по жесткой стенке микротвердость во всем образце превышает исходное значение, равное 1150 МПа, а в области удара наблюдается значительный рост микротвердости до 1800–2700 МПа. Предложено разделение деформированного цилиндра на 4 области: упругого деформирования, пластического, интенсивного пластического деформирования и разрушения. Даны оценки размеров указанных областей для исследованных скоростей удара. По классической формуле Тейлора рассчитан динамический предел текучести, который существенно превышает статический предел текучести и растет с ростом скорости удара. Показаны зависимости динамического предела текучести и максимального усредненного значения микротвердости от скорости удара образца по недеформируемой преграде. Выявлена корреляция максимальных усредненных значений микротвердости и динамического предела текучести, которые возрастают с ростом скорости удара. Представленные данные могут быть полезны для оценки адекватности используемой физико-математической модели для численного расчета задач высокоскоростного деформирования металлов и сплавов.

Список литературы

1. Лапшин, В. Л. Алгоритм управления упруго-вязко-пластичной моделью для исследования процессов ударного взаимодействия тел / В. Л. Лапшин, Е. В. Зеньков // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21. — С. 191−199. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-191-199

2. Dynamic Hardening of AISI 304 Steel at a Wide Range of Strain Rates and Its Application to Shot Peening Simulation / Sungbo Lee, Kwanghyun Yu, Hoon Huh [et al.] // Metals. — 2022. — Vol. 12. — P. 403. https://doi.org/10.3390/met12030403

3. Taylor Impact Tests with Copper Cylinders: Experiments, Microstructural Analysis and 3D SPH Modeling with Dislocation Plasticity and MD-Informed Artificial Neural Network as Equation of State / E. S. Rodionov, V. G. Lupanov, N. A. Gracheva [et al.] // Metals. — 2022. — Vol. 12. — P. 264. https://doi.org/10.3390/met12020264

4. Simple Shear Behavior of 2024-T351 Aluminum Alloy over a Wide Range of Strain Rates and Temperatures: Experiments and Constitutive Modeling / Bin Jia, Alexis Rusinek, Xinke Xiao, Paul Wood // International Journal of Impact Engineering. — 2021. — Vol. 156 — Art. 103972. https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2021.103972

5. Chong Gao. Instrumented Taylor Impact Test for Measuring Stress-Strain Curve through Single Trial / Chong Gao, Takeshi Iwamoto // International Journal of Impact Engineering. — 2021. — Vol. 157. — Art. 103980. https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2021.103980

6. Characteristics in Taylor Impact Test on Projectiles with Various Nose Shapes / Jun-Cheng Li, Gang Chen, Feng-Lei Huang, Yong-Gang Lu // Metals. — 2021. — Vol. 11. — P. 713. https://doi.org/10.3390/met11050713

7. Investigation on the Application of Taylor Impact Test to High-G Loading / Li Juncheng, Chen Gang, Lu Yonggang, Huang Fenglei // Frontiers in Materials. — 2021. — Vol. 8. — P. 717122. 10.3389/fmats.2021.717122

8. Sen, S. Taylor Impact Test Revisited: Determination of Plasticity Parameters for Metals at High Strain Rate / Subhajit Sen, Biswanath Banerjee, Amit Shaw // International Journal of Solids and Structures. — 2020. — Vol. 193 –194. — P. 357–374. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.02.020

9. Киселев, А. Б. Особенности процесса соударения упругопластического цилиндра с недеформируемой преградой / А. Б. Киселев, А. А. Серёжкин // Прикладная математика и механика. — 2015. — Т. 79. — С. 571–583. https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2016.01.011

10. Баяндин, Ю. В. Верификация широкодиапазонных определяющих соотношений для упруговязкопластических материалов с использованием теста Тейлора-Гопкинсона / Ю. В. Баяндин, Д. А. Билалов, С. В. Уваров // Вычислительная механика сплошных сред. — 2020. — Т. 13. — С. 449–458.

11. Моделирование процесса динамического канально-углового прессования медных образцов с учетом экспериментальных условий нагружения / Д. В. Янов, А. С. Бодров, Н. В. Пахнутова, С. А. Зелепугин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2019. — № 60. — С. 141–151. https://doi.org/10.17223/19988621/60/11

12. Численное моделирование процессов динамического канально-углового прессования титановых образцов / А. С. Бодров, Н. В. Олимпиева, А. С. Зелепугин, С. А. Зелепугин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2015. — № 5 (37). — С. 56–63. http://dx.doi.org/10.17223/19988621/37/5

13. Трехмерное моделирование процессов пластического деформирования металлических образцов при динамическом канально-угловом прессовании / С. А. Зелепугин, А. С. Зелепугин, А. С. Бодров, Н. В. Олимпиева // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2013. — Т. 56. — С. 50–52.

14. Armstrong, R. W. Constitutive Relations for Slip and Twinning in High Rate Deformations: A Review and Update / R. W. Armstrong // Journal of Applied Physics. — 2021. — Vol. 130. — P. 245103. https://doi.org/10.1063/5.0075916

15. Khristenko, Y. F. New Light-Gas Guns for the High-Velocity Throwing of Mechanical Particles / Y. F. Khristenko, S. A. Zelepugin, A. V. Gerasimov // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. — 2017. — Vol. 12. — P. 6606–6610.

Поступила в редакцию 08.06.2022
Поступила после рецензирования 11.07.2022
Принята к публикации 11.07.2022

Об авторах:

Пахнутова Надежда Владимировна, аспирант кафедры «Механика деформируемого твердого тела» Национального исследовательского Томского государственного университета (634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 36), младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела «Структурная макрокинетика» Томского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук (634055, РФ, г. Томск, пр. Академический, 10/4), ScopusID, ORCID, nadin_04@mail.ru

Боянгин Евгений Николаевич, ведущий инженер научно-исследовательского отдела «Структурная макрокинетика» Томского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук (634055, РФ, г. Томск, пр. Академический, 10/4), кандидат технических наук, ScopusID, ORCID, jeck2000@list.ru

Шкода Ольга Александровна, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела «Структурная макрокинетика» Томского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук (634055, РФ, г. Томск, пр. Академический, 10/4), кандидат технических наук, ScopusID, ORCID, O.Shkoda@dsm.tsc.ru

Зелепугин Сергей Алексеевич, ведущий научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отдела «Структурная макрокинетика» Томского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук (634055, РФ, г. Томск, пр. Академический, 10/4), профессор кафедры «Механика деформируемого твердого тела» Национального исследовательского Томского государственного университета (634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 36), доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ScopusID, ORCID, szel@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Н. В. Пахнутова — участие в проведении экспериментальных исследований, обработка полученных результатов, написание черновика статьи, формулирование предварительных выводов. Е. Н. Боянгин — фотографирование образцов, измерение микротвердости образцов, обработка полученных результатов. О. А. Шкода — измерение микротвердости, обработка полученных результатов. С. А. Зелепугин — определение целей и задач исследования, организация и проведение экспериментальных работ, редактирование текста статьи и выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE







УДК 621.791
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-232-241

Научная статья



Повышение долговечности сварных стыковых соединений, работающих при циклических нагрузках в двухосном поле напряжений

Ю. Г. Людмирский [1], **В. П. Леонов**[2], **С. С. Ассауленко**[1] ✉
[1] Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
[2] ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» им. И. В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»», Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49
✉ assaulenko_s@mail.ru

Аннотация
Введение. В листовых и корпусных конструкциях, работающих под давлением, разрушение, как правило, локализуется вдоль линии перехода от основного металла к металлу шва. Рассмотрены методы повышения долговечности сварных стыковых соединений, которые направлены на снижение концентрации напряжений и создание благоприятных остаточных напряжений сжатия.

Материалы и методы. Опыты проводились на установке для двухосного изгиба, создающей двухосное поле напряжений. Испытывались образцы заводского исполнения и образцы с дополнительно обработанной зоной перехода от металла шва к основному металлу. Показана эффективность дополнительной обработки следующими методами:

– зачистка абразивным инструментом;
– дробенаклеп;
– зачистка абразивным инструментом с дробенаклепом;
– оплавление границы шва в аргоне без присадочной проволоки;
– оплавление границы шва в аргоне с присадочной проволокой ЭП-410У;
– оплавление границы шва без присадочной проволоки с пластическим деформированием между узкими роликами.

Результаты исследования. Анализировались зарождение, развитие разрушения и его особенности при разных способах дополнительной обработки сварных соединений. Рассчитаны доверительные интервалы (95 %) зарождения и развития разрушений для сварных соединений и основного металла. Оценивалась эффективность предложенных методов дополнительной обработки.

Обсуждение и заключения. Анализ эффективности методов повышения долговечности стыковых сварных соединений показал, что создание плавного перехода от металла шва к основному металлу значительно снижает концентрацию напряжений. Это позволяет увеличить количество циклов до зарождения разрушений и живучесть соединений. Благодаря сжимающим напряжениям в околошовной зоне можно повысить долговечность сварных соединений. Наиболее результативные методы дополнительной обработки сварных швов сочетают уменьшение концентрации напряжений и создание остаточных напряжений сжатия. Самое технологичное решение — переплав зоны перехода в среде аргона с дополнительной присадочной проволокой ЭП-410У.

Ключевые слова: повышение долговечности, циклические нагрузки, стыковые соединения, концентрация напряжений, остаточные напряжения, зарождение и развитие разрушения.

Благодарности. Авторы выражают благодарность д. т. н., профессору, заведующему кафедрой «Машины и автоматизация сварочного производства» Лукьянову В.Ф. за многолетний совместный труд и научное руководство.

Для цитирования. Людмирский, Ю. Г. Повышение долговечности сварных стыковых соединений, работающих при циклических нагрузках в двухосном поле напряжений / Ю. Г. Людмирский, В. П. Леонов, С. С. Ассауленко // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 3. — С. 232–241. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-232-241

Original article

Increasing the Durability of Butt-Welded Joints Operating under Cyclic Loads in a Biaxial Stress Field

Yury G. Lyudmirsky[1], **Valery P. Leonov**[2], **Semyon S. Assaulenko**[1] ✉

[1] Don State Technical University, 1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

[2] Central Research Institute of Structural Materials "Prometey" named after I. V. Gorynin of National Research Center "Kurchatov Institute", 49, Shpalernaya St., Petersburg, Russian Federation

✉ assaulenko_s@mail.ru

Abstract

Introduction. In sheet and hull structures operating under pressure, destruction, as a rule, is localized along the transition line from the base metal to the weld metal. Methods of increasing the durability of butt-welded joints, which are aimed at reducing stress concentration and creating favorable residual compression stresses, are described.

Materials and Methods. The tests were carried out on an installation for biaxial bending, which created a biaxial stress field. Factory-made coupons and samples with an additionally processed transition zone from the weld metal to the base metal were tested. The effectiveness of further processing is shown by the following methods:

– abrading;
– grit hardening;
– abrading with grit hardening;
– melting of the fusion line in argon without filler wire;
– melting of the fusion line in argon with filler wire EP-410U;
– melting of the fusion line without filler wire with plastic deformation between narrow rollers.

Results. The origin, development of destruction, and its features were analyzed using different methods of further processing of joint welds. Confidence spans (95 %) of the origin and development of failures for joint welds and base metal were calculated. The efficiency of the proposed methods for further processing was evaluated.

Discussion and Conclusions. An analysis of the effectiveness of methods for increasing the durability of butt-welded joints has shown that the creation of a smooth transition from the weld metal to the base metal reduces significantly the stress concentration. This provides increasing the number of cycles before the onset of destruction and the survivability of compounds. Due to compressive stresses in the near-weld area, it is possible to increase the durability of joint welds. The most effective methods of further processing of welds combine the reduction of stress concentration and the creation of residual compression stresses. The high-tech solution is remelting the transition zone in an argon medium with an additional EP-410U filler wire.

Keywords: durability increase, cyclic loads, butt joints, stress concentration, residual stresses, origin and development of fracture.

Acknowledgements. The authors are deeply grateful to V. F. Lukyanov, Dr.Sci. (Engineering), professor, Head of the Machines and Welding Fabrication Automation Department, for years of joint work and academic advising.

For citation. Y. G. Lyudmirsky, V. P. Leonov, S. S. Assaulenko. Increasing the Durability of Butt-Welded Joints Operating under Cyclic Loads in a Biaxial Stress Field. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 232–241. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-232-241

Введение. Сварные корпусные и оболочковые конструкции, работающие под давлением, широко применяются в судостроении, химическом, энергетическом машиностроении и других отраслях. Снижение металлоемкости подобных конструкций при одновременном повышении их работоспособности является важнейшей задачей [1–4]. Для уменьшения веса конструкций необходимо использовать более прочные материалы при напряжениях, близких к пределу текучести. В этом случае для обеспечения высокой конструктивной прочности выдвигаются особые требования к выполнению сварных конструкций. Другими словами, необходимо разработать мероприятия, повышающие долговечность конструкций до величин, близких к показателям основного металла.

Цель работы — исследование возможностей повышения долговечности сварных соединений, работающих при циклических нагрузках в коррозионной среде (3 % раствор *NaCl*), с помощью дополнительной обработки швов.

Материалы и методы. Стыковые сварные соединения были выполнены из хромоникельмолибденовой стали. Предварительная термообработка листового материала обеспечивала пределы текучести 900 МПа, 1100 МПа, 1150 МПа. Испытания [5, 6] проводились при двухосном поле напряжений и одновременном действии повторных статических нагрузок в коррозионной среде (3 % раствор *NaCl*). Ручная многопроходная сварка выполнялась низколегированными электродами 48Н11, 48Н13 и аустенитными электродами ЭА 981/15. Разрушение зарождается со стороны растянутых волокон, поэтому напряженное состояние исследовали на растянутой поверхности образца. Напряжения определяли расчетным путем. Измеряли рычажным тензометром Гугенбергера и тензорезисторами с базой 5 мм на расстоянии 10 мм от сварного шва. Если измеренные значения напряжений отличались более чем на 5 % от расчетных, корректировалось давление под образцом.

Разрушение сварных соединений локализуется вдоль линии перехода от основного металла к металлу шва, как показано на рис 1.



Рис. 1. Характер разрушения сварного стыкового соединения (фото авторов)

Основные причины снижения работоспособности сварных соединений по сравнению с листовым металлом [7–11]:

– геометрическая концентрация напряжений;

– остаточные сварочные напряжения;

– ухудшение структуры и свойств основного металла в околошовной зоне под воздействием термического цикла сварки.

Влияние каждого из этих факторов можно частично или полностью нейтрализовать.

На кафедре «Машины и автоматизация сварочного производства» (МиАСП) ДГТУ в течение многих лет испытывались стыковые сварные соединения высокопрочных сталей с различными способами дополнительных обработок (таблица 1). Опыты соответствовали условиям нагружения реальных конструкций.

Таблица 1

Способы дополнительных обработок сварных стыковых соединений в зоне перехода от шва к основному металлу

№	Обработка
1	Зачистка абразивным кругом с зернистостью 80. Радиус галтели R = 30–40 мм
2	Дробенаклеп дробеструйным аппаратом АД-1 со стальной литой дробью ДСЛ-1,5. Давление 5 атм, скорость перемещения головки 75 мм/мин. Зона обработки в месте перехода от шва к металлу 15–30 мм
3	Зачистка абразивным кругом зоны перехода от металла шва к основному металлу 1-м способом и дробенаклеп 2-м способом
4	Оплавление границы шва в среде аргона без присадочной проволоки. Диаметр вольфрамового электрода 3 мм, сила тока I = 120 А, напряжение на дуге U = 10–12 В, скорость сварки 8 м/ч, частота поперечных колебаний 60 мин $^{-1}$, амплитуда колебаний 6 мм

№	Обработка
5	Оплавление границы шва с присадочной проволокой ЭП-410У 4-м способом. Диаметр присадочной проволоки 1,6 мм
6	Оплавление границы шва без присадочной проволоки 4-м способом. Пластическое деформирование между роликами. Диаметр ролика 120 мм, ширина 20 мм. Усилие между роликами 18000 кгс, скорость прокатки 1,4 м/мин

Физические и металлургические процессы, протекающие при сварке, не поддаются моделированию в полном объеме. Поэтому испытания проводили на натурных сварных стыковых соединениях при полном сохранении заводской технологии сварки и геометрических параметров соединений. Малоцикловая усталость сварных соединений исследовалась на образцах в виде дисков диаметром 550 мм толщиной 30 мм на установке УДИ-550 [12]. Их шарнирно закрепляли по контуру и нагружали гидростатическим давлением масла. Под действием гидростатического давления диск осесимметрично изгибался. На внутренней поверхности возникали напряжения сжатия, на внешней — напряжения растяжения, на нее воздействовала коррозионная среда — 3 %-ный водный раствор хлористого натрия. Образцы испытывали при повторном статическом нагружении с частотой 10 циклов/мин.

Максимальные напряжения возникали в центральной части образцов. На большой поверхности выше статистическая вероятность возникновения и развития разрушения, что в целом приближает условия испытания с реальными условиям работы нагруженных корпусных конструкций.

Результаты исследования. В таблице 2 приведены результаты испытаний образцов после дополнительной обработки сварных соединений при циклическом нагружении.

Таблица 2

Влияние дополнительных методов обработки сварных стыковых соединений на характеристики работоспособности

№	Предел текучести, МПа	Сварочные материалы	Вид обработки соединения	Max напряжения цикла, МПа	Доп. обработка	Число циклов до		Место разрушения
						появления трещин, Nт	потери герметичности, Np	
1	1100	ЭА 981/15	1-й способ: абразивная зачистка	700	Нет	2600	20560	Линия перехода*
2						3890	24401	
3					Есть	10840	27237	
4						9115	28947	
5	1100	48Н13	2-й способ: дробенаклеп	860	Нет	2000	7430	Линия перехода
6						2100	11500	
7					Есть	1410	27349	Линия перехода
8						2000	14051	
9	1100	48Н13	3-й способ: абразивная зачистка и дробенаклеп	700	Есть	10670	32310	Линия перехода с выходом на основной металл
10						12430	37540	
11	1100	ЭА 981/15		720	Есть	10870	32840	
12						9300	34460	
13	1100	48Н13	4-й способ: оплавление границы шва в аргоне без присадочной проволоки	700	Нет	3800	24930	Линия перехода с выходом на основной металл
14						2680	21980	
15					Есть	6240	33287	
16						6450	29714	
17		ЭА 981/15			Есть	8320	25400	
18						7000	24250	
19	900	48Н11	5-й способ: наплавка галтельного валика проволокой ЭП410У	605	Нет	4300	29074	Линия перехода
20						4200	23079	
21					Есть	25600	100000	Основной металл и перпендикулярно ко шву
22						29800	58384	
23						30910	91300	
24						24100	86000	
25	1150	48Н11	5-й способ	720	Нет	3386	22639	Линия перехода
26						2566	22433	
27					Есть	7627	39457	Линия перехода и основной металл
28						4890	33405	

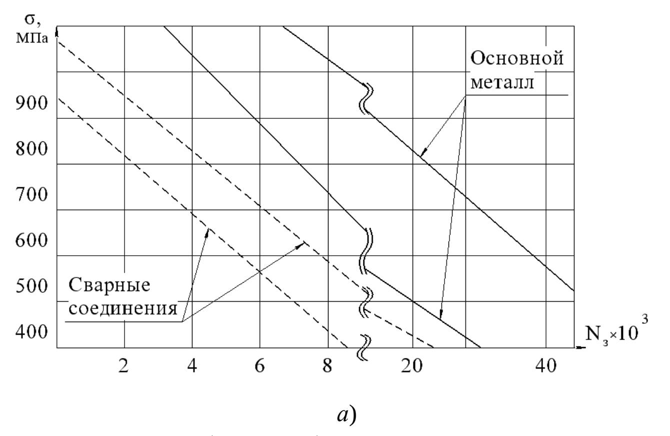
№	Предел текучести, МПа	Сварочные материалы	Вид обработки соединения	Max напряжения цикла, МПа	Доп. обработка	Число циклов до		Место разрушения
						появления трещин, *N*т	потери герметичности, *Np*	
29	1150	48Н13	5-й способ	760	Нет	3890	24401	Линия перехода
30						3285	23245	
31					Есть	8500	36400	Линия перехода и основной металл
32						9886	34636	
33	900	48Н13	Оплавление границы шва 4-м способом + 6-й способ: прокатка шва между узкими роликами	605	Нет	3270	21980	Линия перехода
34						1300	26074	
35						1200	19079	
36						3160	26880	
37					Есть	20860	48210	Основной металл и трещины поперек шва
38						19321	139300	
39						17300	93552	
40						24475	99910	
41		ЭА981/15		720	Нет	3386	22630	Линия перехода
42						2566	22433	
43					Есть	31950	96875	Основной металл и трещины поперек шва
44						23450	78543	
45	1150	48Н13		760	Нет	3285	23245	Линия перехода
46					Есть	22900	87280	Основной металл и трещины поперек шва
47						21168	55039	
*От шва к основному металлу.								

Дополнительная обработка сварных соединений 1-м и 4-м способом (таблица 1) уменьшала концентрацию напряжений за счет увеличения радиуса сопряжения металла шва с основным металлом.

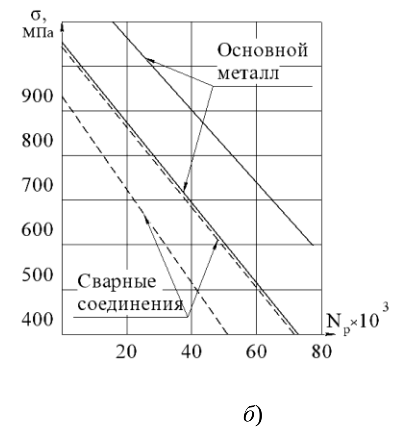
2-й способ создавал в зоне сварного шва небольшие сжимающие напряжения, но практически не менял их концентрацию. Альтернатива предложенному способу — прокатка зоны перехода, представленная в [13].

3-й, 5-й и 6-й способы помимо снижения концентрации напряжений, позволяли получать в зоне перехода от металла шва к основному металлу благоприятные остаточные напряжения сжатия.

На рис. 2 *а* показаны доверительные интервалы (95 %) количества циклов до зарождения разрушения $N_з$, а на рис. 2 *б* — интервалы количества циклов до разрушения $N_р$ для сварных соединений (пунктирные линии), выполненных по заводской технологии, и для основного металла (сплошные линии). Интервалы строили по данным таблицы 2.



а)



б)

Рис. 2. Сравнение работоспособности основного металла и сварных стыковых соединений при повторном статическом нагружении: *а* — число циклов до появления трещин; *б* — число циклов до разрушения

Представлены области разброса значений сопротивления повреждаемости и долговечности сварных стыковых соединений (рис. 2 *а*) и основного металла (рис. 2 *б*) в зависимости от максимальных напряжений при отнулевом пульсирующем цикле нагружения.

Видно, что количество циклов до зарождения разрушения $N_з$ и долговечность сварных стыковых соединений до разрушения N_p (количество циклов до потери герметичности) гораздо меньше, чем у основного металла.

Для определения сжимающих напряжений, которые образовывались в швах в результате обработки, измеряли остаточные напряжения. Этот метод описан в работах [14, 15].

В таблице 3 представлены результаты измерений остаточных напряжений в направлении, перпендикулярном оси шва, на поверхности сварных соединений в околошовной зоне.

Таблица 3

Остаточные напряжения сжатия в зоне сопряжения металла шва с основным металлом
в зависимости от способов дополнительной обработки

Способ дополнительной обработки сварного шва	Сжимающие напряжения, МПа
2-й и 3-й	60–80
5-й	240–320
6-й	700–800

По данным таблицы 2 и рисунка 3 можно судить об эффективности различных способов дополнительной обработки сварных соединений, работающих при циклическом нагружении.

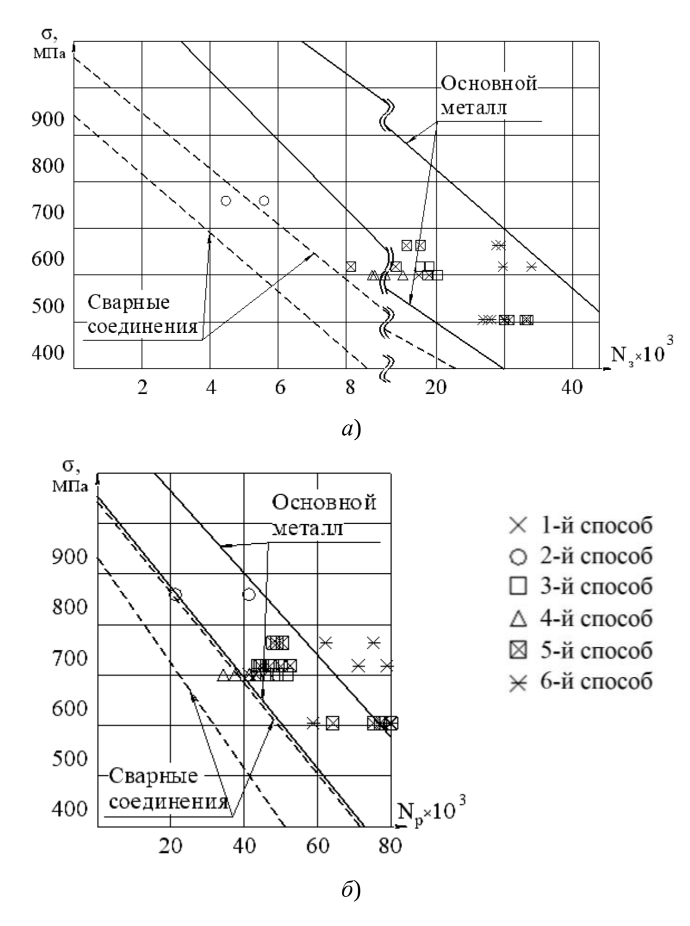


Рис. 3. Эффективность способов дополнительной обработки зоны сопряжения металла шва с основным металлом: *а* — число циклов до появления трещин; *б* — число циклов до разрушения

На рис. 3 показаны результаты испытания образцов стыковых сварных соединений, обработанных разными способами. На рис. 3 *а* представлены доверительные области разброса значений до зарождения разрушения основного металла и стыковых сварных соединений без дополнительной обработки. На рис. 3 *б* — те же области до разрушения образцов (до потери герметичности).

Зачистка зоны перехода от металла шва к основному металлу повышает сопротивляемость зарождению разрушения из-за уменьшения концентрации напряжений (таблица 2). Однако этот способ практически не повлиял на характер развития разрушения. Трещины зарождались и развивались вдоль линии сопряжения металла шва с основным металлом.

Аналогичный характер разрушения имеют образцы, у которых граница шва и основного металла переплавлена дугой в аргоне без присадочного металла (4-й способ). Это привело к уменьшению концентрации напряжений. Как следствие, выросла сопротивляемость зарождению разрушения. При этом практически не измени-

лась сопротивляемость развитию разрушения (рис. 3). 4-й способ по сравнению 1-м более технологичен, т. к. не требует дополнительного оборудования, кроме сварочного.

Дробенаклеп (2-й способ) практически не повлиял на сопротивление повреждаемости, определяемое числом циклов до появления видимой трещины — $N_т$, но увеличил живучесть — число циклов, которое выдержал образец после образования первой трещины до потери им несущей способности (течи). Это объясняется тем, что дробенаклеп не гарантирует однородности поверхностного деформирования металла, особенно в местах соединения с подрезами, наплывами, кратерами и неплавными очертаниями шва. Именно здесь зарождается разрушение. Однако в местах плавного сопряжения металла шва с основным металлом дробеструйная обработка, вызывающая небольшие напряжения сжатия, препятствовала образованию протяженной магистральной трещины, что увеличило сопротивляемость развитию разрушения.

Для повышения эффективности дробенаклепа предложили 3-й способ. Выполняется абразивная зачистка 1-м способом, а затем дробеструйная обработка. В сравнении со 2-м способом примерно на 20 % увеличилась долговечность образцов до зарождения разрушения и до потери герметичности. Сравнение 1-го и 3-го способа показало, что количество циклов до зарождения разрушения фактически не изменилось, однако количество циклов до разрушения (потери герметичности) увеличилось на 20 %.

5-й способ [16] — оплавление границы шва с присадочной проволокой ЭП-410У диаметром 1,6 мм. При охлаждении (140 $^{\circ}$C и ниже) галтельные валики претерпевают мартенситные превращения. При охлаждении до комнатной температуры объем суммарно увеличивается на 1,5 % [11]. Как было показано ранее, это приводит к появлению остаточных напряжений сжатия до 300 МПа. Галтельные валики с повышенным удельным объемом способствуют росту сопротивления повреждаемости и развитию разрушения, то есть увеличению живучести. В таких соединениях первые трещины появлялись либо на основном металле, в стороне от шва, либо одновременно вдоль линии перехода от шва к основному металлу (таблица 2). Трещины, обнаруженные на линии сплавления, как правило, развивались с малой скоростью, и к разрушению приводило слияние трещин на основном металле и в сварном соединении. Типичный внешний вид сварных соединений, дополнительно обработанных 5-м способом, после испытания показан на рис. 4.



Рис. 4. Разрушение стыкового сварного соединения, выполненного 5-м способом (фото авторов)

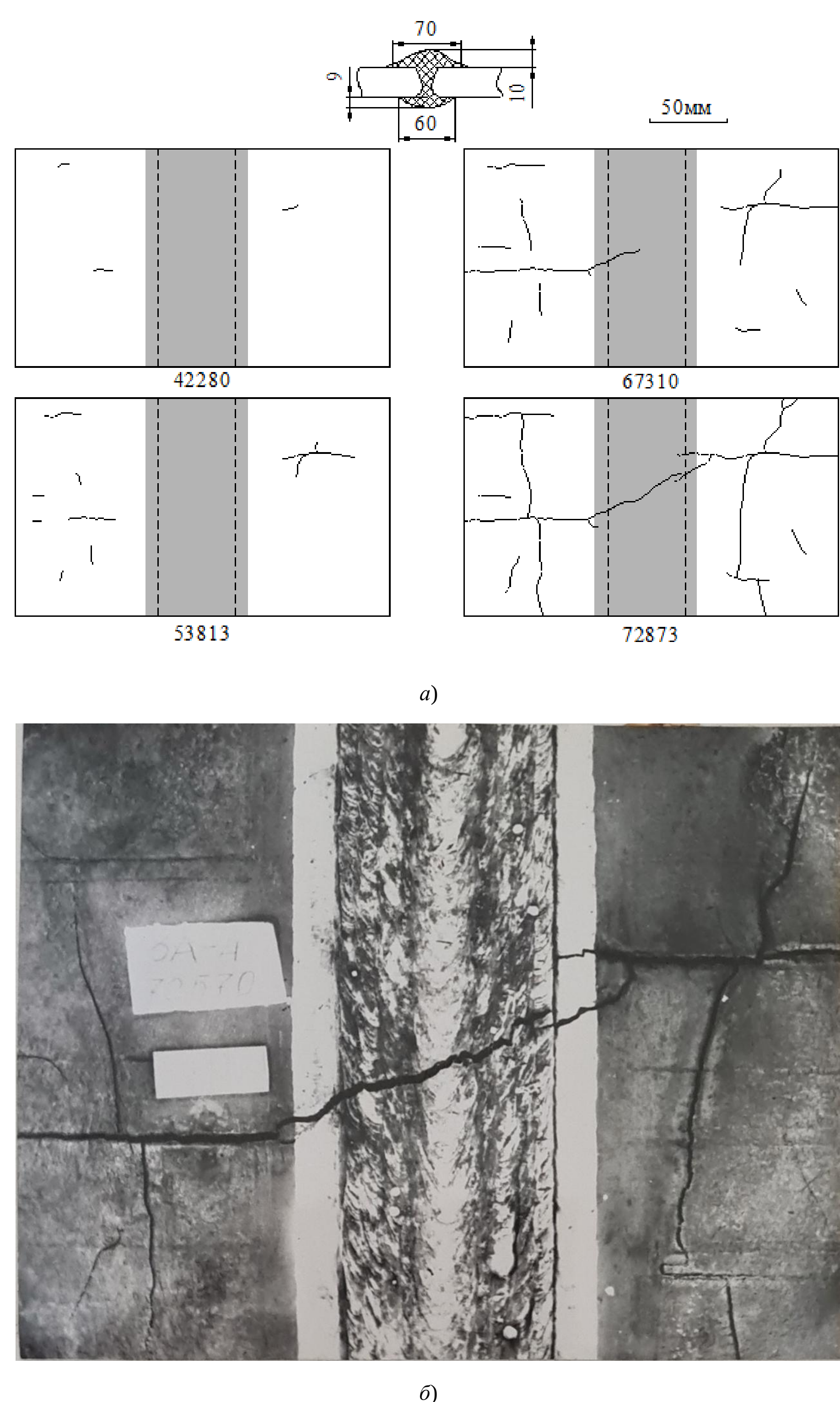
Рассмотренный вид обработки уменьшает концентрацию напряжений по всей длине шва и создает благоприятные остаточные напряжения сжатия в районе галтельных валиков с повышенным удельным объемом.

Действие сжимающих напряжений тормозит зарождение разрушений. С развитием трещин вдоль галтельного валика действие поперечных напряжений сжатия уже не эффективно и отчасти устраняется. Этим можно объяснить отсутствие влияния валиков повышенного удельного объема на живучесть сварных соединений. Если же разрушение зарождается не на галтельном валике, а на основном металле, живучесть сварных соединений возрастает.

Обработка 5-м способом зоны перехода от основного металла к металлу шва увеличила сопротивляемость зарождению и развитию разрушения примерно в 3–4 раза. При этом топография разрушения заметно изменилась. Первые трещины, как правило, зарождались в основном металле (рис. 4). При наличии плохо заваренных кратеров на лицевой поверхности шва трещины зарождались в этих местах и развивались преимущественно

перпендикулярно шву, но и в этом случае сопротивляемость зарождению и развитию разрушения оставалась довольно высокой (таблица 2, 5-й способ).

Поверхностное пластическое деформирование околошовной зоны [12] в стыковых соединениях путем обкатки узкими роликами (6-й способ) позволило довести сопротивляемость зарождению и развитию разрушения до уровня аналогичных характеристик основного металла. Этот вывод подтверждается характером разрушения сварных соединений, выполненных 6-м способом (рис. 5).



а)

б)

Рис. 5. Характер зарождения и развития разрушения сварного соединения, зона сопряжения которого прокатана между узкими роликами (6-й способ): *а* — кинограмма развития разрушения образца; *б* — внешний вид сварного соединения при разрушении (фото авторов)

Видно, что разрушение зарождалось и развивалось по основному металлу (рис. 5 *а*, табл. 2 и характер разрушения соединений, показанный на рис. 5 *б*). Оплавление границы шва и последующая его прокатка между

узкими роликами (6-й способ) увеличили сопротивляемость зарождению разрушения примерно в 8 раз, живучесть сварных соединений — примерно в 4 раза.

Обсуждение и заключения

1. В качестве исходных образцов рассмотрели сварные соединения, выполненные по заводской технологии без дополнительной обработки зоны перехода. В этом случае при циклическом нагружении по линии перехода от металла шва к основному металлу наблюдается многоочаговое зарождение усталостных трещин. Они быстро развиваются и объединяются в одну магистральную. Затем она развивается в глубину, что приводит к потере герметичности. Долговечность сварных соединений оказывается в 2–3 раза меньше, чем у основного металла.

2. Задействовали два вида дополнительной обработки:

– зачистка зоны перехода от шва к основному металлу абразивным инструментом (1-й способ);

– переплав зоны перехода от шва к основному металлу неплавящимся электродом, дугой, горящей в среде аргона (4-й способ).

Это позволило увеличить сопротивляемость зарождению разрушения почти в 2 раза. Живучесть этих сварных соединений практически не изменилась.

3. Дробеструйная обработка (2-й способ) практически не сказалась на количестве циклов до зарождения разрушения, но несколько увеличила число циклов до разрушения.

4. Предварительная зачистка абразивным инструментом зоны перехода от металла шва к основному металлу и последующая дробеструйная обработка (3-й способ) почти в 1,5 раза увеличили сопротивляемость сварных соединений зарождению и развитию разрушения.

5. При наплавке галтельного валика материалом с подходящими объемными изменениями (5-й способ) трещины возникают в зоне перехода и в основном металле. При этом примерно в 3–4 раза увеличивается сопротивляемость зарождению и развитию разрушения.

6. Оплавление границы шва без присадочной проволоки (4-й способ) и пластическое деформирование между узкими роликами (6-й способ) обеспечивают рост сопротивления повреждаемости и живучести сварных соединений практически до уровня аналогичных характеристик основного металла.

Список литературы

1. Винокуров, В. А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В. А. Винокуров, С. А. Куркин, Г. А. Николаев ; ред. Б. Е. Патон. — Москва : Машиностроение, 1996. — 576 с.

2. Leonov, V. P. Structural and Technological Strength of Steel for Marine Structures / V. P. Leonov, V. A. Malyshevskii // Metal Science and Heat Treatment. — 2001. — Vol. 43 — P. 444.

3. Ильин, А. В. Определение параметра трещиностойкости CTOD для металла сварных соединений судокорпусных сталей при низких климатических температурах / А. В. Ильин, В. П. Леонов, В. Ю. Филин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2009. — № 32. — С. 120–146.

4. Фетисова, Е. А. Особенности диффузионных процессов в сварных соединениях из разнородных сталей / Е. А. Фетисова, А. Г. Лупачев // Вестник Белорусско-Российского университета. — 2014. — № 3. — С. 79–87. https://doi.org/10.53078/20778481_2014_3_79

5. Ilyin, A. V. On the Problem of Quantitative Service Life Assessment for High-Strength Steel Welded Structures under the Effect of Corrosion Medium / A. V. Ilyin, V. Yu. Filin // Procedia Structural Integrity. — 2019. — Vol. 14. — P. 964–977. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.078

6. Kazuo Tateishi. Low Cycle Fatigue Strength of Butt-Welded Steel Joint by Means of New Testing System with Image Technique / Kazuo Tateishi, Takeshi Hanji // International Journal of Fatigue. — 2004. — Vol. 26. — P. 1349–1356. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.03.016

7. О выявлении трещиноподобных дефектов сварки существующими методами контроля качества / В. А. Передельский, В. Я. Харченко, А. Л. Черногоров, С. В. Тихонов // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 1. — С. 89–95. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-1-89-95

8. Контроль остаточных напряжений в околошовной зоне сварного шва / В. А. Быченок, И. В. Беркутов, А. Л. Майоров [и др.] // Технология машиностроения. — 2019. — № 12. — С. 45–50.

9. Application of Finite Element Method for Simulation of Stress-Strain State in Manufacturing of Long Turbine Blades Made of High-Strength Titanium Alloys / V. P. Leonov, I. A. Schastlivaya, T. N. Igolkina [et al.] // Inorganic Materials: Applied Research. — 2014. — Vol. 5. — P. 578–586. https://doi.org/10.1134/S2075113314060069

10. Zerbst, U. Application of Fracture Mechanics to Weld Fatigue / U. Zerbst, J. Hensel // International Journal of Fatigue. — 2020. — Vol. 139. — Art. 105801. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105801

11. Influence of Weld Joint Geometry and Strength Mismatch on Load Bearing Capacity of API Pipeline / Jong-Hyun Baek, Yun-Chan Jang, Ik-Joong Kim [et al.] // International Journal of Pressure Vessels and Piping. — 2022. — Vol. 199. — Art. 104737. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104737

12. Ильин, А. В. Определение конструктивной и технологической концентрации напряжений в сварных узлах при оценках усталостной прочности оболочечных конструкций / А. В. Ильин, К. Е. Садкин // Вопросы материаловедения. — 2012. — № 2 (70). — С. 161–176.

13. Lyudmirskii, Y. G. Constructive and Technological Method of Increasing Durability of “Choke Connections” / Y G. Lyudmirskii, S. S. Assaulenko, S. O. Ageev // Journal of Physics Conference Series. — 2021. — Vol. 2131. — Art. 042061. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/4/042061

14. Fatigue Life Improvement Using Low Transformation Temperature Weld Material with Measurement of Residual Stress / J. Franks, G. Wheatley, P. Zamani [et al.] // International Journal of Fatigue. — 2022. — Vol. 164. — Art. 107137. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107137

15. Measurement and Analysis of Welding Deformation and Residual Stress in CMT Welded Lap Joints of 1180 MPa Steel Sheets / Ritsu Nishimura, Ninshu Ma, Yong Liu [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. — 2021. — Vol. 72. — P. 515–528. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.10.050

16. Evaluation of Fatigue Fracture Mechanism in a Flash Butt Welding Joint of a U75V Type Steel for Railroad Applications / Xiaohui Zhao, Yanjun Fan, Yu Liu [et al.] // Engineering Failure Analysis. — 2015. — Vol. 55. — P. 26–38. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.05.001

Поступила в редакцию 08.08.2022
Поступила после рецензирования 29.08.2022
Принята к публикации 31.08.2022

Об авторах:

Людмирский Юрий Георгиевич, профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ScopusID, ORCID, lyudmirskiy40@mail.ru

Леонов Валерий Петрович, заместитель генерального директора ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» им. И. В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей») (191015, РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49), доктор технических наук, ScopusID, ORCID, leonov_vp@spbstu.ru

Ассауленко Семен Семенович, старший преподаватель кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, ORCID, assaulenko_s@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

С. С. Ассауленко — формирование основной концепции, постановка целей и задач исследования, проведение расчетов, подготовка текста. Ю. Г. Людмирский — научное руководство, доработка текста, формулирование выводов. В. П. Леонов — анализ результатов, корректировка выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE







УДК 620.179.18
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-242-251

Научная статья



Исследование параметров конических резьб, влияющих на качество соединения труб нефтяного сортамента

И. К. Цыбрий[1] ✉, **Н. С. Коваль**[1], **Ж. Н. Исабеков**[2]
[1] Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
[2] Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22а
✉irconst@mail.ru

Аннотация
Введение. С ростом объемов добычи и транспортировки газа и нефти повышается актуальность проблемы герметичности соединения труб нефтегазового сортамента. Наиболее распространены муфтовые и безмуфтовые резьбовые соединения. Используются резьбы типа «Батресс», конические трапецеидальные и треугольные резьбы. От их качества напрямую зависит герметичность соединения. На процесс производства труб и муфт влияют многие факторы. В качестве примеров можно привести технологическую наследственность, жесткость технологического оборудования, его наладку и подналадку. Требуемое качество соединения обеспечивается качеством элементов. Сборка должна учитывать возможность полной взаимозаменяемости. Второй рекомендуемый вариант — групповая сборка. Во всех случаях обязательны контрольные операции. В работе приводятся результаты исследований распределения в партии параметров качества резьб труб и муфт.
Материалы и методы. Исследовались фрагменты (патрубки) обсадных труб с трапецеидальной резьбой и повышенной герметичностью (ОТТГ) и с трапецеидальной резьбой профиля «Батресс». Их произвольно выбрали из различных партий. При измерении образцы закреплялись в патрон токарного станка 1И611П. Средством измерения был индикатор часового типа 0 класса точности со стойкой. Для оценки полученных данных использовали общепринятые статистические методы.
Результаты исследования. Эксперименты позволили выявить, как на герметичность соединения методом полной взаимозаменяемости влияет радиальное биение поверхностей вершин профиля резьбы, фасок патрубка и уплотнительного пояска.
Обсуждение и заключения. Обнаружены существенные отклонения значений параметров резьбы от допустимых, что может стать причиной разгерметизации соединения. Получение качественного и надежного соединения возможно при сборке по методу неполной или групповой взаимозаменяемости.

Ключевые слова: соединение труб нефтяного сортамента, качество соединения, контроль качества, соединение «Батресс», соединение ОТТГ, радиальное биение поверхностей резьбы «Батресс», радиальное биение поверхностей резьбы ОТТГ.

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка материалов и предложения по их совершенствованию способствовали значительному повышению качества статьи.

Для цитирования. Цыбрий, И. К. Исследование параметров конических резьб, влияющих на качество соединения труб нефтяного сортамента / И. К. Цыбрий, Н. С. Коваль, Ж. Н. Исабеков // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 3. — С. 242–251. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-242-251

Original article

Study of Tapered Threads Parameters Affecting the Quality of the Oil Pipeline Connection

Irina K. Tsybrii[1] ✉, **Nikolai S. Koval**[1], **Zhanibek N. Issabekov**[2]
[1] Don State Technical University, 1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, Russian Federation
[2] Satbayev University, 22, Satbaev St., Almaty, Republic of Kazakhstan
✉irconst@mail.ru

Abstract
Introduction. With the growth in the production and transportation of gas and oil, the urgency of the problem of tightness of the connection of pipes of the oil and gas range increases. The most common are coupling and streamline threaded connections. Threads of the buttress type, conical trapezoidal, and triangular threads are used. The tightness of the connection depends directly on their quality. The production of pipes and couplings is influenced by many factors. Examples include technological heredity, rigidity of technological equipment, its setting and resetting. The required connection quality is provided by the quality of the elements. The assembly should take into account the possibility of complete interchangeability. The second recommended option is a group assembling. In all cases, control operations are mandatory. The paper presents the results of studies on the distribution of pipe and coupling thread quality parameters in the batch.
Materials and Methods. Fragments (tubular parts) of casing pipes with trapezoidal thread and increased tightness (CPTT) and with trapezoidal thread of the buttress profile were studied. They were randomly selected from different batches. When measuring, the samples were fixed in the chuck of 1I611P lathe. The measuring instrument was a clock type 0 accuracy class indicator with a stand. Generally accepted statistical methods were used to evaluate the data obtained.
Results. The experiments have found how the tightness of the connection through the method of complete interchangeability is affected by the radial runout of the surfaces of the thread profile tops, the pipe chamfers, and the sealing belt.
Discussion and Conclusions. Significant deviations of the values of the thread parameters from the permissible ones were found, which might cause a leak in the connection. Obtaining a high-quality and reliable connection is possible when assembling by the method of incomplete or group interchangeability.

Keywords: OCTG connection, connection quality, quality control, buttress connection, CPTT connection, radial runout of buttress thread surfaces, radial runout of CPTT thread surfaces.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to reviewers, whose critical assessment of the materials and suggestions for their improvement contributed to a significant improvement in the quality of the article.

For citation. I. K. Tsybrii, N. S. Koval, Zh. N. Issabekov. Study of Tapered threads parameters affecting the quality of the oil pipeline connection. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 242–251. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-242-251

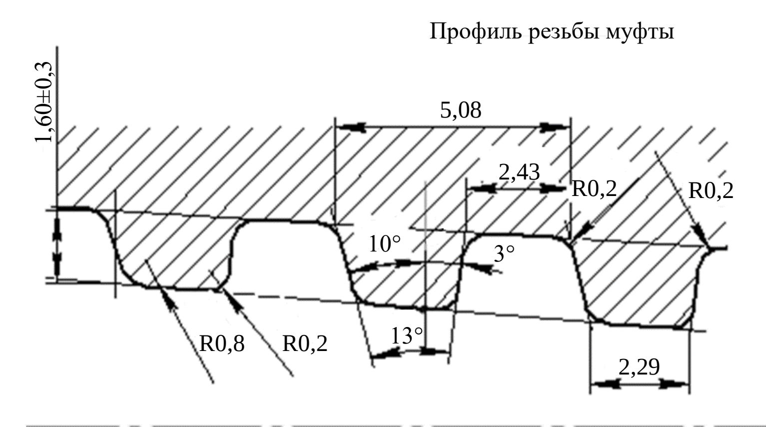
Введение. Ужесточение условий эксплуатации труб связано с усложнением профилей и увеличением глубин скважин на новых месторождениях нефти и газа. Трубы нефтяного и газового сортамента оказываются под действием значительных знакопеременных нагрузок при диапазоне рабочих температур от минус 60 °C до плюс 200 °C [1–6]. Рассматриваемые изделия должны удовлетворять требованиям по сопротивлению усталостному и хрупкому разрушению, а также коррозионной стойкости в условиях агрессивных сред. Это обусловливает выбор материалов для их производства. Значительная протяженность нефте- и газопроводов предполагает обеспечение надежного соединения труб. Отечественные производители предлагают муфтовые и безмуфтовые соединения с коническими трапецеидальными и треугольными резьбами [7–10]. В муфтовых выделяют типы:

– ОТТГ (для обсадных труб с трапецеидальной резьбой и повышенной герметичностью);

– с трапецеидальной резьбой «Батресс».

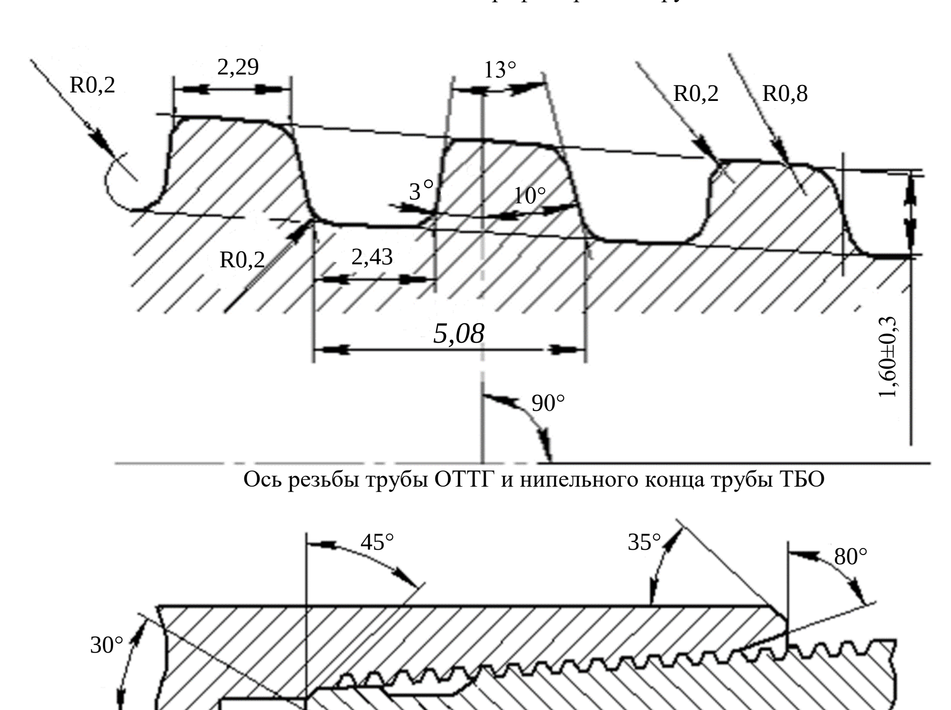
Соединение первого типа отличается высокой герметичностью и стойкостью к растягивающим нагрузкам. Эти качества обеспечивает форма профиля резьбы — неравнобедренная трапеция с шагом 5,08 мм и конусностью 1:16 (рис. 1).

Профиль резьбы муфты



Ось резьбы муфты ОТТГ и раструбного конца трубы ТБО





Ось резьбы трубы ОТТГ и нипельного конца трубы ТБО

Рис. 1. Муфтовое соединение обсадных труб типа ОТТГ

Угол закладной стороны трубы в 10° обеспечивает легкую посадку в муфту и снижает вероятность заедания резьбы. При растягивающих и изгибающих нагрузках резьба трубы не должна выходить из зацепления с резьбой муфты, поэтому опорная сторона профиля выполнена под углом 3° [8–12]. Расположенные за резьбой сопряженные конические уплотнительные поверхности повышают герметичность. При соединении величина натяга ограничивается благодаря контакту изделий по внутренним упорным торцам. Уплотнительное кольцо из фторопласта повысит герметичность соединения [13].

Схема муфтового соединения с трапецеидальной резьбой типа «Батресс» представлена на рис. 2.

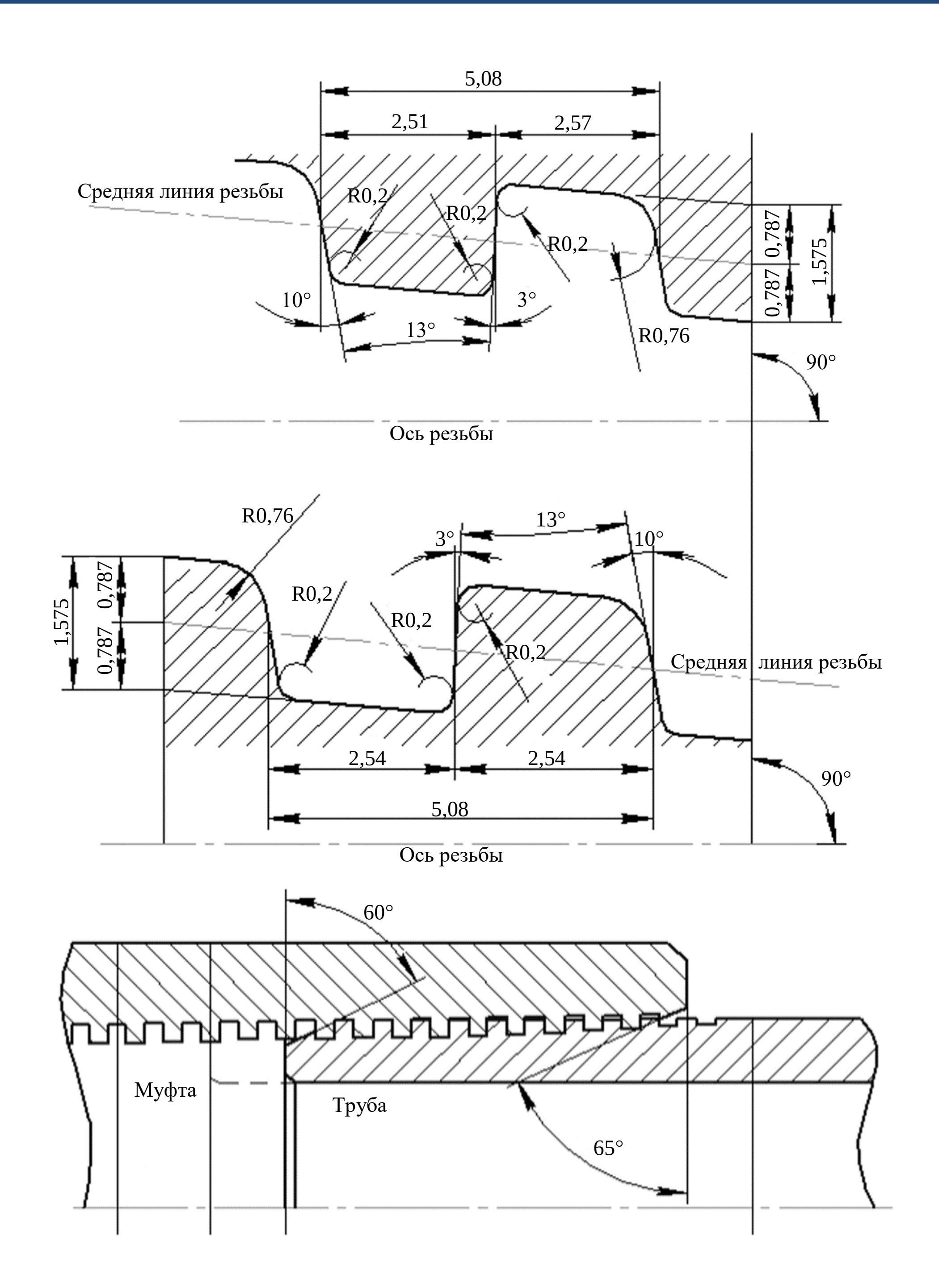


Рис. 2. Муфтовое соединение обсадных труб типа «Батресс»

Отличительная особенность этого типа соединения — возможность продолжительное время принимать значительные растягивающие нагрузки. Профиль резьбы «Батресс» имеет форму неравнобедренной трапеции с шагом 5,08 мм и конусностью 1:16 [14].

Углы наклона закладной и опорной стороны — 10° и 3° соответственно. Это упрощает сборку и снижает вероятность заедания. Для герметичности используют специальную смазку или фторопластовые кольца [15].

Основные требования к распространенным типам соединений обсадных труб:

– проходимость в стволах скважин различной сложности и глубины, в том числе на участках значительного искривления;

– герметичность колонн труб и высокая прочность для всех видов нагрузок;

– обеспечение прохода приспособлений и инструмента во внутреннее пространство колонн труб при технологических операциях.

Необходимо строго соблюдать требования стандартов к качеству резьбовых соединений, а также к средствам и методам контроля. Характеристики резьбовых соединений обсадных труб регламентируются

ГОСТ 632–80 и международным стандартом API 5B. Эти документы предписывают контролировать следующие параметры: внешний вид резьбы, геометрические параметры резьбы и уплотнительных конических поверхностей, натяг по резьбовому рабочему калибру.

Отметим, что не всегда совпадают формы сопрягаемых элементов трубы и муфты в поперечных сечениях. В этих случаях на некоторых участках сопрягаемые поверхности не будут контактировать, т. е. сопряжение останется неплотным. Это создает условия для течи в соединении. Если такой зазор не устранить с помощью силовой затяжки конических соединений, то невозможно обеспечить эффект кольцевого замка, который гарантирует герметичность. Таким образом, отклонения от конусности создают предпосылки для неплотностей и течей. В качестве примера рассмотрим соединения ОТТГ и «Батресс» трубы с наружным диаметром 127 мм. На участке 25,4 мм допустимые отклонения от конусности составляют соответственно: ${}^{+0,3}_{-0,2}$ мм и ${}^{+0,45}_{-0,25}$ мм.

Материалы и методы. Данные, полученные в рамках исследования, прошли статистическую обработку с использованием общепринятых методов.

Для определения степени герметичности годных труб измерили радиальное биение конических и цилиндрических поверхностей патрубков. Эти элементы закрепляли в обратных кулачках трехкулачкового токарного патрона (т. е. по поверхности базирования трубы на станке 1И611П) при условии минимизации упругих деформаций объекта от усилий зажима. Сначала кулачки патрона приводили в контакт с патрубком с усилием, достаточным для его удержания навесу, — так корректировали его осевое положение в патроне при прокручивании шпинделя. Визуально контролировали биение поверхностей. Затем в плоскости кулачков создавали контакт поверхности патрубка и закрепленного на стойке индикатора часового типа (рис. 3). Патрубок зажимали в кулачках патрона. По стрелке индикатора следили, чтобы усилие зажима не деформировало стенку патрубка между кулачками патрона.

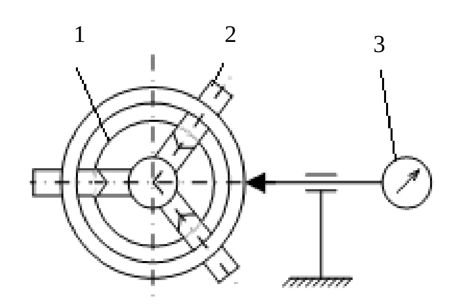


Рис. 3. Схема измерения радиального биения патрубков и муфт:
1 — изделие; 2 — трехкулачковый патрон; 3 — индикатор часового типа

Для измерения биения уплотнительного пояска и фаски суппорт станка со стойкой индикатора первоначально оставался неподвижным, а сферический наконечник индикатора устанавливался на середину пояска и середину фаски. Показания индикатора считывались и регистрировались поворотом шпинделя станка через каждые 10° (фиксировали в 36 сечениях, начиная с нулевого). Индикатор перемещался в осевом направлении детали, наконечник сохранял положение относительно центра фаски или пояска.

Измерили биение резьбовой поверхности по ленточке выступа резьбы. Для этого гитару и коробку подач станка настроили на дюймовую резьбу с пятью нитками на дюйм. После включения маточной гайки ходового винта прокручиванием шпинделя выбрали все мертвые хода в кинематике станка. При этом индикатор был настроен на середину ленточки первой нитки резьбы в нулевом сечении. Показания индикатора фиксировались через каждые 10° поворота патрубка во всех 36 сечениях на пяти нитках резьбы. В процессе измерения индикатор также перемещался в осевом направлении детали с сохранением положения наконечника относительно центра ленточки.

Результаты исследования. На рис. 4 в полярной системе координат представлены результаты измерения радиального биения наружных поверхностей патрубков с различными соединениями.

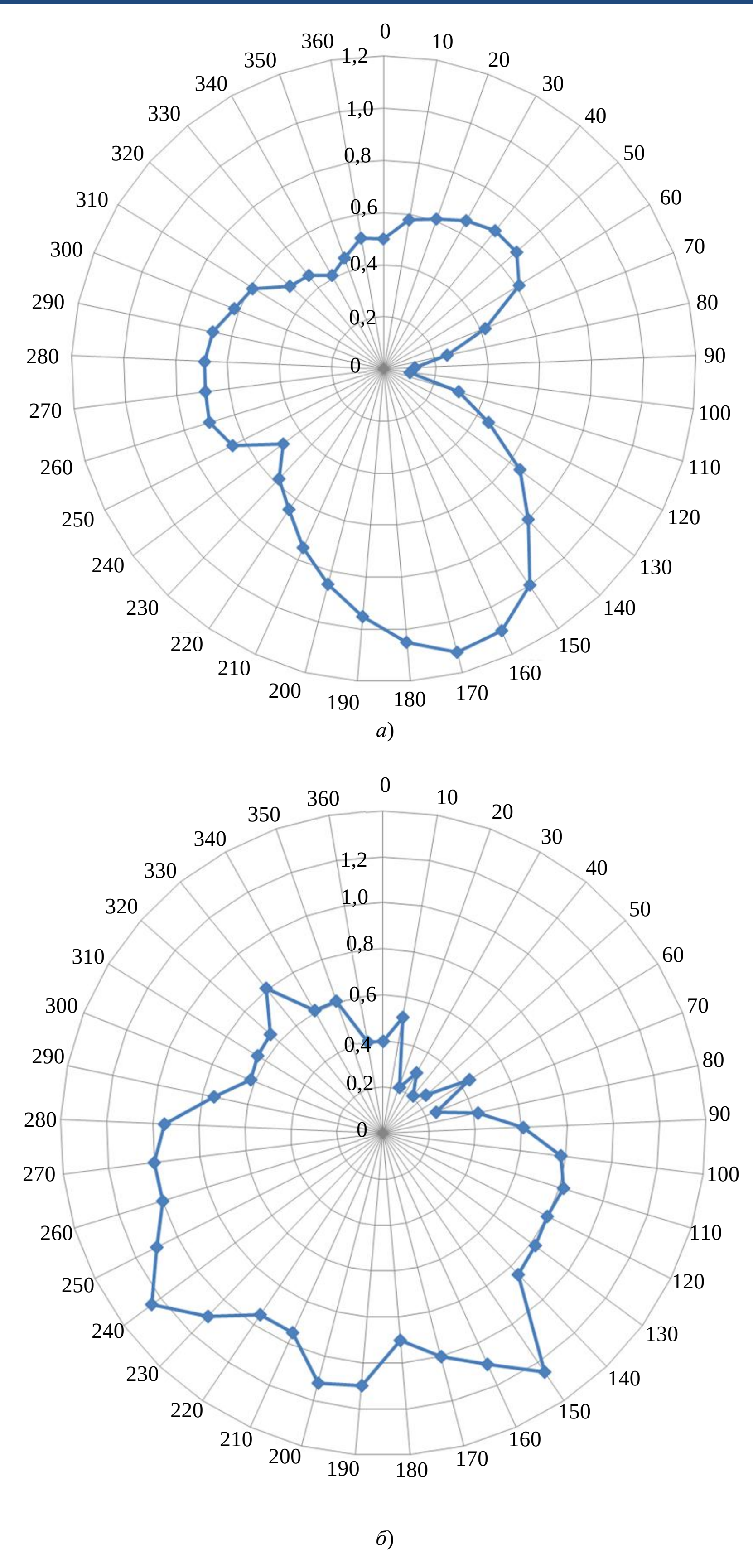


Рис. 4. Радиальное биение наружных поверхностей труб с резьбой: *а* — «Батресс»; *б* — ОТТГ

Для контроля конусности в поле допуска измерили отклонения вершин резьбы на пяти нитках от заданного профиля (спираль Архимеда) в радиальном направлении. Для патрубка «Батресс» по значениям измеренного радиального биения поверхности вершин резьбы построили график в полярной системе координат (рис. 5 *а*). Здесь радиальная шкала имеет значения от 0 до 2 мм, а круговая шкала — от 0° до 360°. Аналогично исследовали радиальное биение вершин выступов резьбы на патрубках ОТТГ (рис. 5 *б*).

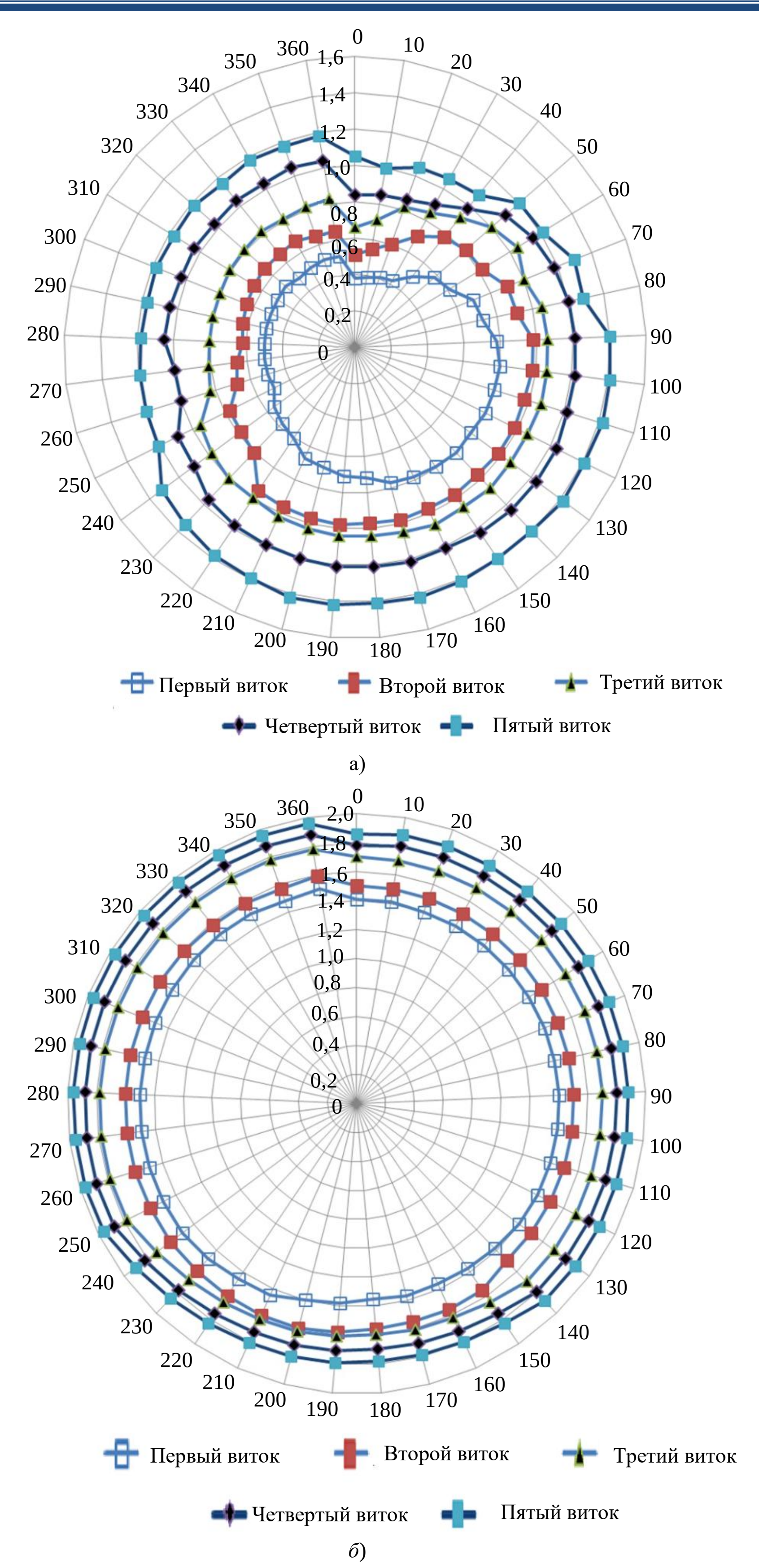


Рис. 5. Радиальное биение поверхности вершин резьбы от начала резьбы на пяти оборотах: *а* — «Батресс»; *б* — ОТТГ

Диаграмма (рис. 6 *а*) построена по результатам измерения радиального биения фасок патрубков с резьбой «Батресс». Значения радиального биения пояска отражены на графике 6 *б*, который демонстрирует отклонение от круглости уплотнительного пояска. Сопоставление полученных разными методами значений отклонения формы пояска от круглости показывает их идентичность.

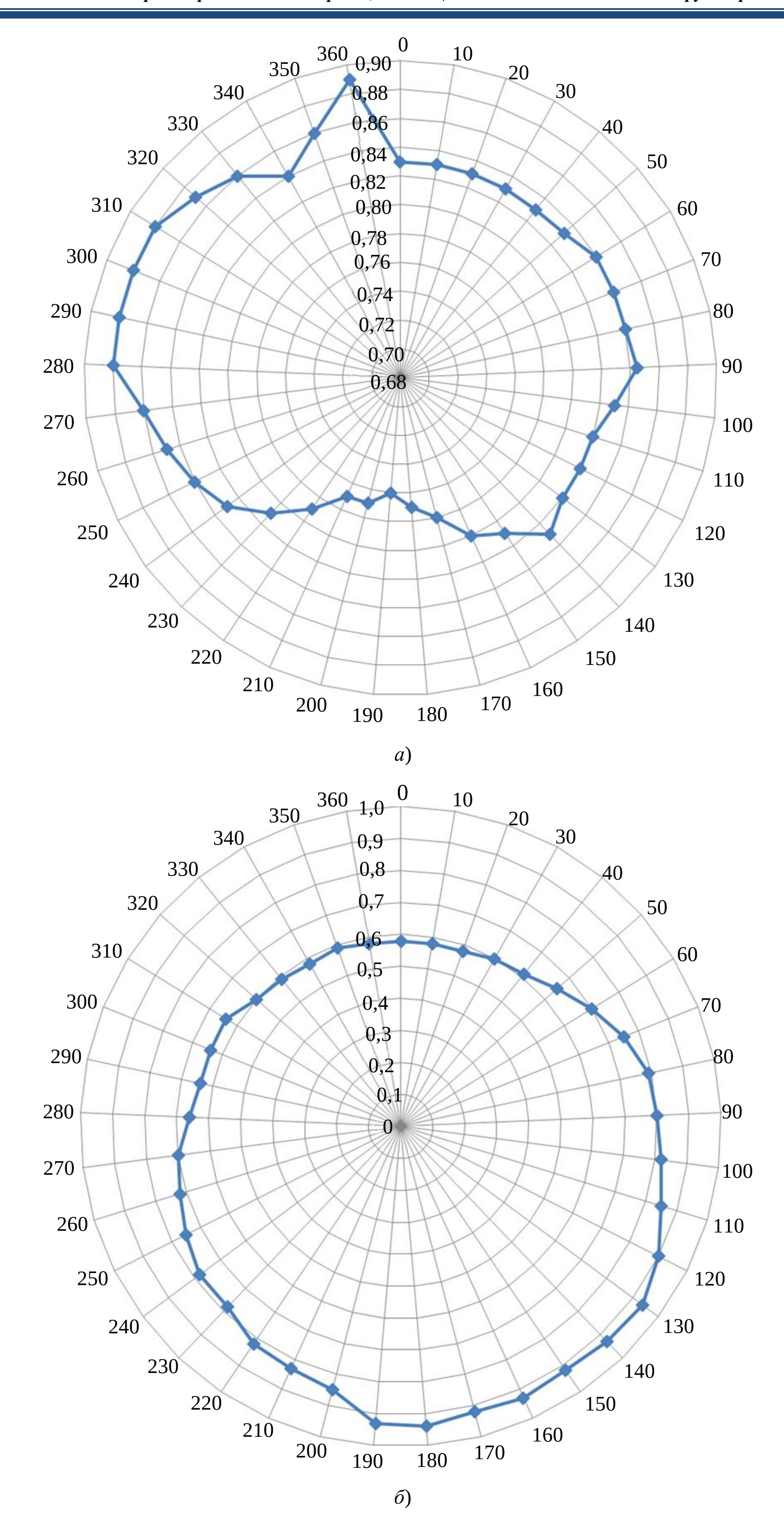


Рис. 6. Радиальное биение: *а* — фаски патрубка с резьбой «Батресс»; *б* — уплотнительного пояска соединения ОТТГ

Обсуждение и заключения. Анализ рис. 4 показывает, что для труб с различными типами соединений характерны значительные отклонения конусности. В то же время поверхность трубы с резьбой «Батресс» сравнительно гладкая. Если же диаграмма визуализирует резьбу ОТТГ, то наблюдаются резкие выбросы большого количества точек. Это значит, что на поверхности трубы есть грубый макрорельеф со значительными случайными перепадами уровня поверхности.

На рис. 5 *а* хорошо видна неплавность восходящей линии спирали с разностью радиусов-векторов более 0,4 мм. Волнообразное изменение линии ординат профиля — это следствие несовпадения оси вращения патрубков с осью резьбы. Эту гармоническую составляющую можно компенсировать специальной математической обработкой, которая не запланирована в настоящем исследовании. Анализ рис. 5 *б* показывает достаточно большую неплавность восходящей линии вершины резьбы. Это говорит о значительных отклонениях рассматриваемой поверхности от заданного профиля (спираль Архимеда) для соединения ОТТГ.

Анализ рис. 6 показывает, что отклонение от круглости (разность наибольшего и наименьшего радиусов-векторов биения) составляет около 0,25 мм. Погрешности формы уплотнительного пояска для соединения типа ОТТГ определены разными методами. По измеренным значениям диаметра пояска (в плоскости торца) обнаружена вариация размеров до 0,25 мм (от нулевого сечения, через 30°): 169,35; 169,20; 169,10; 169,15; 169,25; 169,30. Угловое распределение отсчетов диаметра указывает на овалообразную форму поверхности пояска в поперечном сечении.

Таким образом, можно сделать вывод о значительных отклонениях у поверхностей труб и муфт. Речь идет о качестве резьб, фасок, поясков, что определяет надежность соединения. Эти отклонения обусловливают появлениев партии бракованных изделий. Их использование не обеспечивает герметичность и надежность соединения «труба — муфта», что ведет к течи при гидравлических испытаниях. Достижение заданного качества соединения обеспечивается только методом групповой взаимозаменяемости, который требует предварительного разделения собираемых изделий на группы и генерирует дополнительные затраты. Необходимо ужесточить допуски на изготовление резьбовых частей труб и муфт, что позволит выполнять сборку методом полной взаимозаменяемости. Рассматриваемые отклонения могут возникать из-за нестабильности технологического процесса получения резьб. В частности, негативно сказывается недостаточная жесткость технологической системы и ее несвоевременная подналадка.

Список литературы

1. Failure and Integrity Analysis of Casings Used for Oil Well Drilling / G. P. Cirimello, L. Otegui, G. Carfi, W. Morris // Engineering Failure Analysis. — 2017. — Vol. 75. — P. 1–14. http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.11.008

2. Song, S. Optimizing Exoskeleton Assistance for Faster Self-Selected Walking / S. Song, S. H. Collins // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. — 2021. — Vol. 29. — P. 786–795. http://dx.doi.org/10.1109/TNSRE.2021.3074154

3. Muscle-Tendon Mechanics Explain Unexpected Effects of Exoskeleton Assistance on Metabolic Rate during Walking / R. W. Jackson, C. L. Dembia, S. L. Delp, S. H. Collins // Journal of Experimental Biology. — 2017. — Vol. 220. — P. 2082–2095. https://doi.org/10.1242/jeb.150011

4. Non-destructive Testing Techniques Based on Failure Analysis of Steam Turbine Blade / Li Tian, Yan Hai, Zeng Qingyue, Yin Qin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 576. — P. 012038. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/576/1/012038/meta

5. Experimental Study of Hoop Stress of Crescent Shaped and Eccentric Worn Casing / Yinping Cao, Yan Pan, Hongxue Mi [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — Vol. 804. — P. 022014. http://doi.org/10.1088/1755-1315/804/2/022014

6. FE Simulation of Sealing Ability for Premium Connection Based on ISO 13679 CAL IV Tests / Yihua Dou, Yufei Li, Yinping Cao [et al.] // International Journal of Structural Integrity. — 2020. — Vol. 12. — P. 138–148. http://dx.doi.org/10.1108/IJSI-11-2019-0125

7. Analysis of the Performance Improvement Effect of Combined Packing for Oil and Gas Well Packer / Huifeng Liu, Wei Zhang, Yinping Cao, Yihua Dou // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2020. — Vol. 514. — P. 022017. http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/514/2/022017

8. Prediction and Analysis of Wellbore Temperature and Pressure of HTHP Gas Wells Considering Multifactor Coupling /Jie Zheng, Yihua Dou, Yinping Cao, Xin Yan // Journal of Failure Analysis and Prevention. — 2020. — Vol. 20. — P. 23–28. http://dx.doi.org/10.1007/s11668-020-00811-2

9. YinhuaDou. An Experimental Study of Whirling Motion and the Relationship between Torque and Rotary Speed for Simulated Casing Drilling /Yinhua Dou, Stefan Miska, Yinping Cao // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. — 2020. — Vol. 56. — P. 285–299. http://dx.doi.org/10.1007/s10553-020-01138-2

10. Laboratory Study on Casing Deformation during Multistage Horizontal Well Fracturing in Shale Gas Development and Strain Based Casing Design / Shangyu Yang, Lihong Han, Jianjun Wang [et al.] // Journal of Natural

Gas Science and Engineering. — 2021. — Vol. 89. — P. 103893. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103893

11. Failure Analysis of Casing Dropping in Shale Oil Well during Large Scale Volume Fracturing / Hang Wang, Wenlong Zhao, Zhenhui Shu [et al.] // Engineering Failure Analysis. — 2020. — Vol. 118. — P. 104849. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104849

12. Coupled Seepage-Mechanical Modeling to Evaluate Formation Deformation and Casing Failure in Waterflooding Oilfields / Lihong Han, Fei Yin, Shangyu Yang [et al.] // Journal of Petroleum Science and Engineering. — 2019. — Vol. 180. — P. 68–72. http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2019.05.035

13. Fatigue and Corrosion Fatigue Behaviors of G105 and S135 High-Strength Drill Pipe Steels in Air and H_2S Environment / Lihong Han, Ming Liu, Sheji Luo, Tian Jian Lu // Process Safety and Environmental Protection. — 2019. — Vol. 124. — P. 63–74. http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.023

14. Mechanical Performance of Casing in In-situ Combustion Thermal Recovery /Shangyu Yang, Lihong Han, Chun Feng [et al.] // Journal of Petroleum Science and Engineering. — 2018. — Vol. 168. — P. 32–38. http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2018.04.068

15. Research on Well Trajectory Deduction Method Based on Pythagorean-Hodograph Quintic Space Curves / Yufei Li, Yinping Cao, Yuxue Liu [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 688. — P. 033068. https://doi.org/10.1088/1757-899X/688/3/033068

Поступила в редакцию 01.08.2022
Поступила после рецензирования 29.08.2022
Принята к публикации 31.08.2022

Об авторах:

Цыбрий Ирина Константиновна, доцент кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, с. н. с., ORCID, irconst@mail.ru

Коваль Николай Сергеевич, доцент кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ResearcherID, ScopusID, ORCID, koval-nc@mail.ru

Исабеков Жанибек Назарбекулы, заведующий кафедрой «Промышленный инжиниринг» Казахского национального исследовательского технического университета имени К. И. Сатпаева (050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22 а), магистр технических наук, ORCID, zh.issabekov@satbayev.university

Заявленный вклад соавторов:

И. К. Цыбрий — научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, корректировка выводов. Н. С. Коваль — подготовка текста, формулирование выводов, анализ результатов исследований. Ж. Н. Исабеков — доработка текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE







УДК 621.792
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-252-260

Научная статья



Методики и оборудование для экспериментальной оценки работоспособности оболочковых и корпусных конструкций

Ю. Г. Людмирский[1] ✉, **С. С. Ассауленко**[1], **А. В. Крамской**[2]

[1] Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

[2] Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», Российская Федерация, г. Волгодонск, ул. Жуковское шоссе, 10

✉lyudmirskiy40@mail.ru

Аннотация

Введение. Толстостенные корпусные конструкции, работающие под давлением, относятся к наиболее распространённому типу сварных конструкций ответственного назначения. При нагружении названных конструкций внутренним давлением в них возникает сложное двухосное поле напряжений, которое суммируется с полями остаточных сварочных напряжений. Поэтому для выбора технологии изготовления сварных ответственных конструкций результатов, полученных при обычных одноосных испытаниях образцов, бывает недостаточно. Многообразие факторов, влияющих на работоспособность конструкций, и трудности раздельной оценки их влияния привели к необходимости максимального приближения условий эксперимента к реальным условиям работы конструкции.

Материалы и методы. Испытания натурных конструкций имеют ряд достоинств, но они чрезвычайно дороги и, как правило, выявляют только одно, наиболее слабое звено, несущая способность остальных элементов конструкции остаётся невыясненной. Для испытания были использованы радиометрические установки УДИ, разработанные для разных типоразмеров образцов. Такие установки позволяют испытывать образцы различных форм и типов сварных соединений (стыковых, тавровых), изменять положение привариваемых деталей.

Результаты исследований. Не отвергая результатов, полученных при испытаниях натурных конструкций в работах МВТУ им. Баумана, ДГТУ, ЦНИИ КМ «Прометей», авторы предложили основной объём исследований провести на отдельных элементах конструкций, которые отражали бы характерные особенности нагружения, технологию изготовления и условия эксплуатации. Была применена конструкция соединений «штуцер — лист», позволяющая увеличить показатели зарождения и развития разрушения до уровня основного металла.

Обсуждение и заключения. Представлены схемы конструкций для получения в образцах двухосного поля растяжения или изгиба. Испытанные по предложенным схемам образцы позволяют сделать выводы о работоспособности сварных соединений в условиях, приближенных к реальной работе исследуемых конструкций. Такая схема испытаний используется исследовательскими лабораториями в нашей стране и во всем мире.

Ключевые слова: испытания натурных конструкций, опыт проектирования, установки для двухосного растяжения и изгиба, долговечность, соединение «штуцер — лист».

Благодарности. Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой «МиАСП» В. Ф. Лукьянову за многолетний совместный труд и научное руководство.

Для цитирования. Людмирский, Ю. Г. Методики и оборудование для экспериментальной оценки работоспособности оболочковых и корпусных конструкций / Ю. Г. Людмирский, С. С. Ассауленко, А. В. Крамской // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 3. — С. 252–260. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-252-260

Original article

Methods and Equipment for Experimental Evaluation of the Performance of Shell and Hull Structures

Yury G. Lyudmirsky[1] ✉, **Semyon S. Assaulenko**[1], **Aleksandr V. Kramskoi**[2]

[1] Don State Technical University, 1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

[2] AEM-Technologies, Atommash Branch, 10, Zhukovsky Highway, Volgodonsk, Rostov Region, Russian Federation

✉lyudmirskiy40@mail.ru

Abstract

Introduction. Pressure-operated thick-walled hull structures are the most common type of high-duty welded structures. When these structures are loaded with internal pressure, a complex biaxial stress field arises in them, which is summed up with the fields of residual welding stresses. Therefore, when selecting a technology for manufacturing critical welded structures, the results obtained during conventional uniaxial tests of samples are insufficient. The variety of factors affecting the performance of structures, and the difficulties of separate assessment of their influence, caused the need to maximize the approximation of experimental conditions to the real working conditions of the structure.

Materials and Methods. Testing of full-scale structures has a number of advantages, but they are extremely expensive, and, as a rule, only one, the weakest link, is identified, the bearing capacity of the other structural elements remains unclear. For testing, UDI radiometric installations designed for different sample sizes were used. The presented installations allow testing samples of various shapes, types of welded joints (butt, T-bar), changing the position of welded parts.

Results. Without rejecting the results obtained during the testing of full-scale structures in the works of the Bauman Moscow State Technical University, DSTU, NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey", and the authors proposed to conduct the basic scope of the research on individual structural elements that would reflect the characteristic features of loading, manufacturing technology, and operating conditions. The design of the "fitting-sheet" connections was applied, which made it possible to increase the indicators of the failure initiation and propagation to the level of the base metal.

Discussion and Conclusions. Schemes of structures for obtaining a biaxial tension or bending field in samples were presented. Samples tested according to the proposed schemes allowed us to draw conclusions about the performance of welded joints under conditions close to the actual operation of the structures under study. The proposed test scheme is used by research laboratories in our country and around the world.

Keywords: tests of full-scale structures, design experience, installations for biaxial tension and bending, durability, "fitting-plate" connection.

Acknowledgments. The authors are deeply grateful to V. F. Lukyanov, Dr.Sci. (Engineering), professor, Head of the Machines and Welding Fabrication Automation Department, for years of joint work and academic advising.

For citation. Y. G. Lyudmirsky, S. S. Assaulenko, A. V. Kramskoi. Methods and Equipment for Experimental Evaluation of the Performance of Shell and Hull Structures. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 252–260. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-252-260

Введение. Толстолистовые корпусные конструкции, работающие под давлением, относятся к наиболее распространённому типу сварных конструкций ответственного назначения. В этих конструкциях при нагружении внутренним давлением возникает сложное, преимущественно двухосное напряжённое состояние с суммированием полей остаточных сварочных напряжений с полями напряжений от внешней нагрузки. В этих условиях нередко проявляется повышенная чувствительность как основного металла, так и сварных соединений к наличию концентраторов напряжений или местному изменению механических свойств металла, связанному с процессом изготовления, что может привести к резкому снижению прочности. В настоящее время несмотря на ряд проведенных фундаментальных исследований прочности сварных листовых и корпусных конструкций все еще недотаточно систематизированных данных о закономерностях сопротивления зарождению и развитию разрушений крупногабаритных элементов сварных конструкций в зависимости от конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. Поэтому для выбора материала и технологии изготовления ответственных листовых конструкций данных, полученных при обычных одноосных испытаниях образцов, бывает недостаточно. Многообразие факторов, влияющих на работоспособность конструкций, и трудности раздельной оценки их влияния сделали необходимым максимальное приближение хода эксперимента к реальным условиям. Это привело к распространению методов испытания полноразмерных конструкций либо их моделей. Для проведения таких испытаний в нашей стране и за рубежом созданы стенды, оснащённые

сложной испытательной и диагностической аппаратурой. Так, например, для испытания полноразмерных труб большого диаметра имеются стенды в УралНИТИ, на Волжском трубном заводе, во ВНИИСТе, в ЦНИИ КМ «Прометей» и в других лабораториях. Стенды аналогичного назначения есть в Японии. В США имеется более 300 установок для испытания конструкций, работающих под статическим и пульсирующим давлением.

Испытания натурных конструкций имеют ряд достоинств:

– сохраняется реальная технология изготовления конструкции, в результате чего исключается неопределённость, связанная с влиянием моделирования технологического процесса изготовления на результаты испытаний;

– сохраняется реальная схема нагружения отдельных элементов и узлов конструкций;

– они позволяют установить действительное распределение деформаций в конструкции и уточнить принятую расчётную схему;

– позволяют оценить сопротивляемость зарождению и развитию разрушения только одного наиболее слабого элемента конструкции;

– позволяют изучить влияние концентрации напряжений и остаточных напряжений на усталостную прочность.

Несмотря на несомненную ценность натурных испытаний для оценки конструктивной прочности изделия крайне нерационально использовать такие испытания для исследования отдельных факторов, влияющих на прочность конструкции. Обилие факторов, одновременно влияющих на ход исследования, затрудняет анализ причин преждевременного разрушения и не позволяет раздельно оценить степень влияния каждого из них. В результате испытания полноразмерных конструкций, как правило, удается выявить наиболее слабое звено, несущая способность остальных участков (элементов) конструкции остается неизвестной.

Отмеченные выше недостатки могут быть практически устранены, если основную долю исследований выполнять на уменьшенных в размерах моделях оболочковых конструкций. Такие испытания позволяют получить ответы на вопросы, связанные с конструктивной прочностью и надежностью изделия, выявить степень опасности появления и развития трещиноподобных дефектов, оценить эффективность различных способов повышения долговечности.

Не отвергая результатов испытаний, полученных на простых одноосных образцах и при испытаниях натурных конструкций в МВТУ им. Баумана, ДГТУ, ЦНИИ КМ «Прометей», авторы предлагают основной объём исследований перенести на испытания отдельных элементов конструкции, которые отражают характерные особенности ее нагружения, технологию изготовления и условия эксплуатации.

Применительно к оболочковым и корпусным конструкциям при испытаниях следует учитывать:

– напряжённое состояние (двухосное с равными либо неравными компонентами главных напряжений);

– характер нагружения (статический либо повторно-статический с различными циклами нагружения);

– влияние окружающей среды;

– влияние температуры эксплуатации.

Материалы и методы. В данной работе изложен опыт проектирования установок для испытания металла и сварных соединений при двухосном напряжённом состоянии.

Анализ, проведенный в работах [1–5], показал, что условия работы металла и сварных соединений в листовых конструкциях наиболее полно воспроизводятся при испытании методом гидростатического выпучивания. В этом случае образец закрепляется либо опирается по контуру и нагружается гидростатическим давлением.

Напряжённое состояние, возникающее в металле образца, зависит от формы образца, условий его закрепления (защемление или свободное опирание на матрицу), формы матрицы. На рис. 1 показаны схемы нагружения и возникающие двухосные напряжения изгиба или растяжения.

При нагружении гидростатическим давлением плоского образца, опертого по контуру кругового отверстия матрицы, возникает двухосный изгиб, значительная часть внешней выпуклой поверхности образца испытывает равномерное растяжение с равными компонентами напряжений $\sigma_1 = \sigma_2$ (рис. 1 *а*). Если плоский образец надежно защемлен по контуру отверстия матрицы, то на двухосный изгиб накладывается двухосное растяжение. В случае нагружения не плоского образца, а сферического сегмента при достаточно большом отношении диаметра отверстия матрицы к толщине образца изгибная составляющая мала, и можно считать, что центральная часть образца испытывает двухосное растяжение с $\sigma_2/\sigma_1 = 1$ (рис. 1 *б*). Двухосное растяжение с неравными компонентами в пределах отношения $\sigma_2/\sigma_1 = 1{,}0...0{,}75$ можно получить выпучиванием образца по схеме, приведенной на рис. 1 *б*, при использовании матриц с эллиптическими отверстиями.

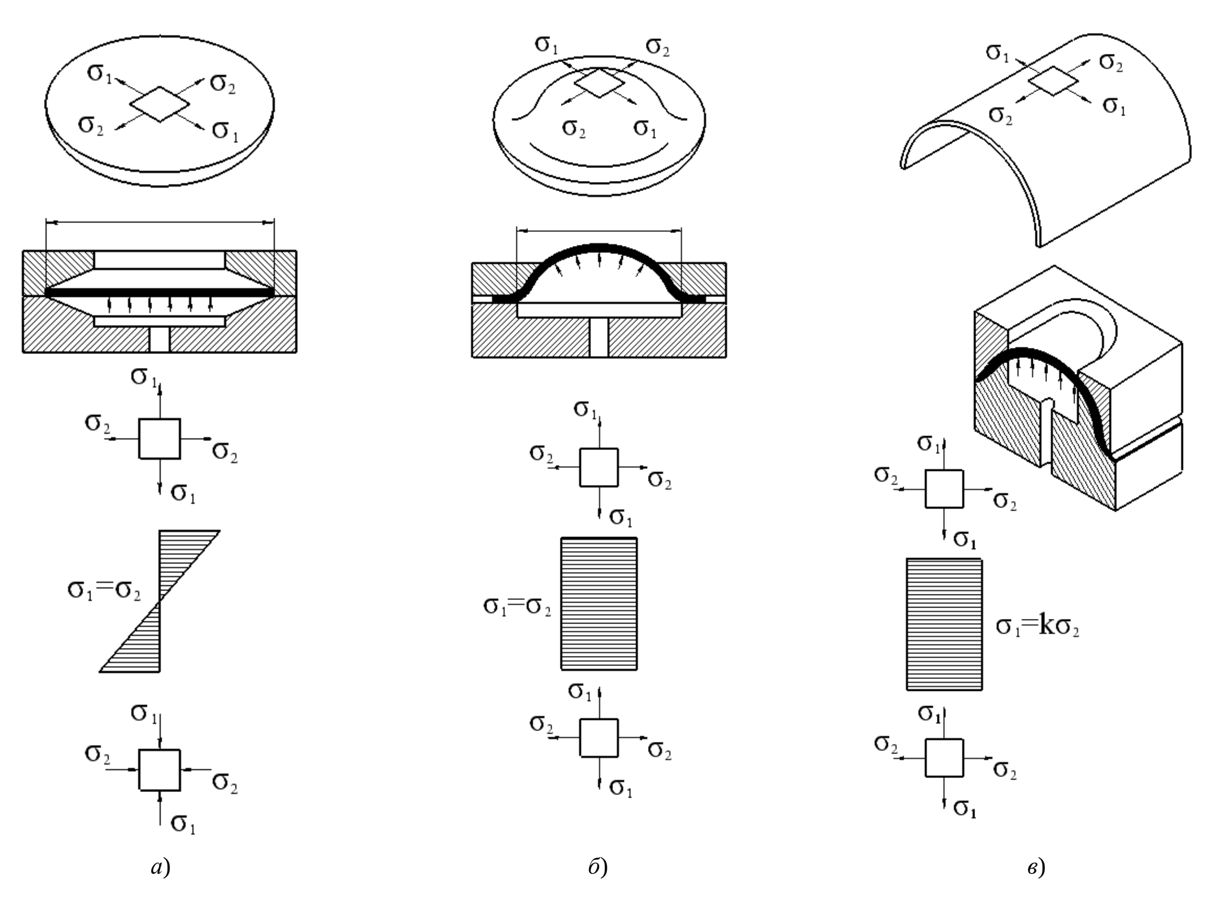


Рис. 1. Схемы нагружения образцов для получения в них двухосного поля напряжений:
а — нагружение плоского образца с равными компонентами напряжений; *б* — нагружение сферического сегмента;
в — нагружение образца в виде цилиндрической панели

Дальнейшее уменьшение отношения σ_2/σ_1 = (0,7… 0,3) достигается с помощью схемы, показанной на рис. 1 *в*, где гидростатическим давлением нагружается образец в виде цилиндрической панели, защемленной фланцевой частью между цилиндрической матрицей и цилиндрическим пуансоном [3, 4].

Для листовых конструкций, работающих под давлением, характерны два типа нагружения: однократное (статическое) и малоцикловое (повторно-статическое). Для первого целесообразно использовать схемы *а* и *б* (рис. 1). Испытание по схеме *а* при статическом нагружении можно проводить как на образцах в виде плоских листов, так и в виде предварительно сформованных сферических сегментов [5–7]. Предпочтительнее листы, поскольку изготовление их менее трудоёмко. Образцы в виде сферического сегмента позволяют уменьшить влияние краевого эффекта от закрепления образца по контуру, однако подготовка таких образцов требует пластического деформирования, а это может привести к изменению механических свойств материала, что не всегда исправимо даже последующей термообработкой.

При испытаниях в условиях малоциклового нагружения могут быть использованы все три схемы, приведенные на рис. 1. Однако предпочтение следует отдать двухосному изгибу по схеме *а*, так как она позволяет испытывать большие толщины.

Оценку сопротивляемости зарождению и развитию разрушения при растяжении обычно производят, используя схемы *б* и *в* (рис. 1), на предварительно сформованных образцах, которые выполнены в виде сферического сегмента или цилиндрической панели.

Окружающая среда особенно сильно влияет на результаты длительных и повторно-статических испытаний. Большой интерес представляет стойкость материалов при повторно-статическом нагружении в коррозионных средах [8–10].

Для исследования процессов зарождения и кинетики развития разрушения в элементах корпусных конструкций в ДГТУ совместно с ЦНИИ КМ «Прометей» разработана серия установок: УДИ-550, УДИ-980, УДИ-1300. Основные их характеристики для двухосного изгиба представлены в таблице 1.

Достоинства таких установок:

– для нагружения не требуются мощные силовозбудители;

– возможно испытание образцов с относительно равномерным распределением напряжений на большой поверхности;

– имеется возможность проводить испытания отдельных элементов сварных конструкций с почти полным сохранением технологических особенностей и характера распределения напряжений в районе сварных швов, учитывать влияние коррозионной среды.

Таблица 1

Характеристики силовых блоков установок для испытания основного металла и сварных соединений в условиях двухосного изгиба

Установки	Геометрические параметры образцов для испытания		Предел текучести материалов σ 0,2, МПа	Максимальное давление P, МПа
	диаметр, мм	толщина, мм		
УДИ-550	550	20–40	≤ 900	≤ 1000
УДИ-980	980	30–60	≤ 900	≤ 1000
УДИ-1300	1300	60–100	≤ 900	≤ 1000

Созданные установки позволяют определять циклическую прочность различных материалов на воздухе и в коррозионной среде, получать информацию о характере разрушения при различном конструктивно-технологическом оформлении сварных соединений натурной толщины, оценивать эффективность использования различных методов повышения долговечности.

Конструкция установок, предназначенных для испытания в условиях двухосного изгиба сварных соединений из листового металла толщиной 20–100 мм с пределом текучести до 15 МПа, показана на рис. 2. Они состоят из четырёх блоков 1, в которых закрепляются образцы, пульта управления 2 и насосных станций, которые на рисунке не показаны.

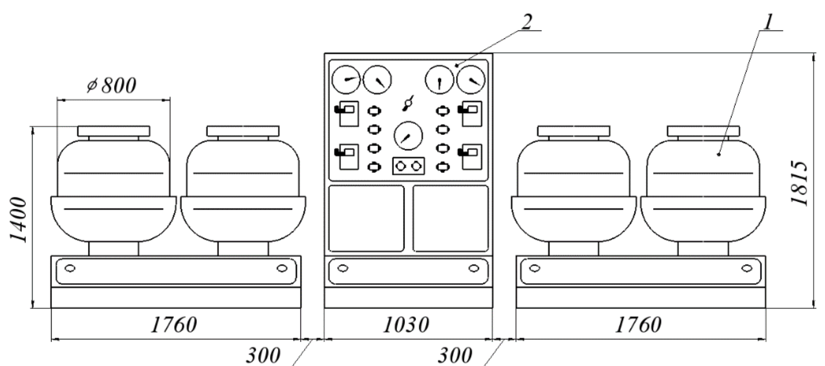


Рис. 2. Конструкция установок для испытания в условиях двухосного изгиба:
1 — испытательная установка; 2 — пульт управления

Принципиальная конструкция силовых блоков установок УДИ-550, УДИ-980, УДИ-1300 одинакова и показана на рис. 3.

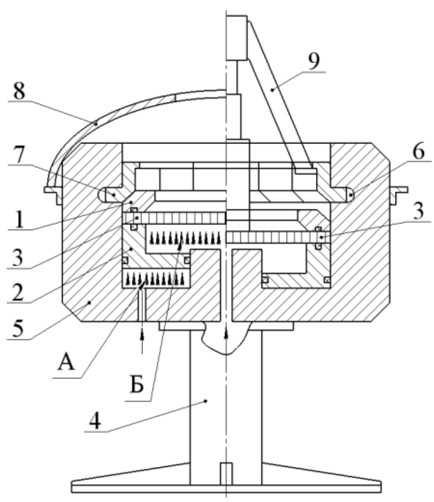


Рис. 3. Силовой блок установок типа УДИ для испытания сварных соединений при двухосном изгибе: 1 — матрица; 2 — гидроприжим; 3 — испытуемый образец; 4 — основание; 5 — запорное устройство (стакан); 6 — внутренний кольцевой паз; 7 — кольцевые запорные сектора; 8 — защитный кожух; 9 — гидродомкрат

Установка содержит матрицу 1 и гидроприжим 2, между которыми размещается образец 3 и запорное устройство 5, которое неподвижно закреплено на основании 4. Запорное устройство выполнено в виде неподвижного гладкого стакана с внутренним пазом 6, в котором по всему периметру располагаются кольцевые запорные сектора 7 (восемь шт.), имеющие Г-образную форму в осевом сечении.

Установка работает следующим образом. Образец 3 в виде круглого диска устанавливают на гидроприжим 2, сверху на него устанавливают матрицу 1. Затем в паз запорного устройства 5 закладывают восемь съемных кольцевых секторов 7, прижимая их плотно друг к другу так, чтобы обеспечить минимальные зазоры между ними.

Установку накрывают защитным кожухом 8. После этого включают насосную станцию и подают давление в полость А, образуемую дном запорного устройства 5 и гидроприжимом 2. Под действием давления гидроприжим 2 перемещается вверх, прижимает образец 3 к матрице 1, а матрицу — к кольцевым секторам 7. Сектора упираются в опорную поверхность кольцевого паза и внутреннюю поверхность стакана 5, препятствуя перемещению матрицы 1, тем самым осуществляется0 закрепление образца 3 в установке.

Затем поток жидкости направлялся в полость Б под образцом 3. Под действием давления образец, опирающийся на кромку отверстия в матрице 1, прогибается, и на его внешней стороне возникают двухосные напряжения растяжения. Величина растягивающих напряжений на поверхности регулируется давлением в полости Б. Гидросистема позволяет обеспечивать повторно-статическое нагружение образцов с частотой нагружения 10 циклов в минуту.

Схема разборки и извлечения образца показана в правой части рис. 3.

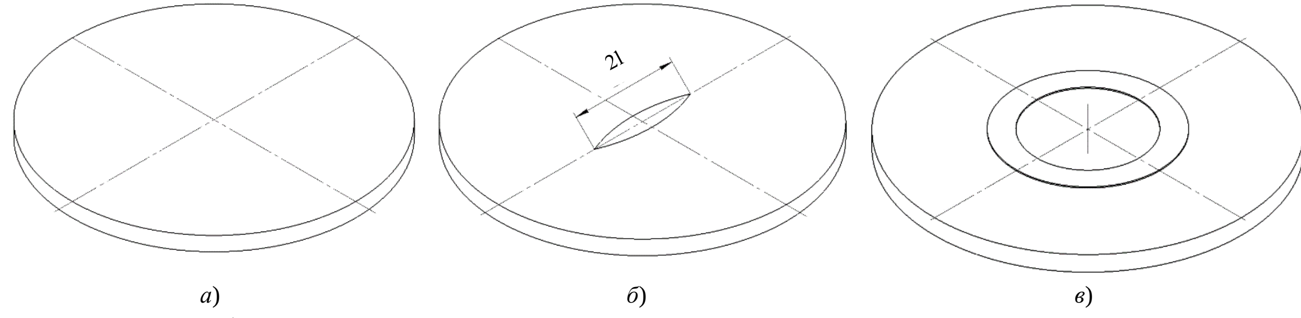
После окончания испытаний на образец 3 устанавливают гидродомкрат 9, который своими лапами упирается в выступы на кольцевых секторах 7. При подключении домкрата к гидросистеме установки его поршень надавливает на образец и перемещает его вместе с гидроприжимом 2 вниз, в исходное положение, что позволяет произвести разбор установки.

В процессе испытания фиксируется количество циклов до зарождения разрушения (длина трещины 8–12 мм), кинетика развития трещин, фиксируется и разрушение образца (в данном случае это потеря герметичности).

Электрическая и гидравлическая схемы установок позволяют осуществлять статическое либо повторно-статическое нагружение. Цикл нагружения может быть пульсирующим или с положительным коэффициентом асимметрии. Частота нагружения образцов регулируется от 2 до 10 циклов в минуту.

В тех случаях, когда представляет интерес действие коррозионной среды, её заливают в полость, образованную образцом и матрицей 1. Для предохранения от коррозии матрицу следует покрыть слоем эпоксидной смолы или лаком либо наклеить на образец кольцевой резиновый буртик, препятствующий растеканию коррозионной среды за пределы испытуемой части образца.

В зависимости от цели испытаний используются образцы различных видов и типоразмеров. В качестве примера некоторые из них показаны на рис. 4.



а) *б*) *в*)

Рис. 4. Образцы, позволяющие оценивать влияние коррозионной среды (3-процентный раствор NaCl): *а* — из основного; *б* — линейный надрез; *в* — кольцевой надрез

Для оценки сопротивления зарождению и развитию разрушения основного металла в двухосном поле напряжений при одновременном действии коррозионной среды целесообразно использовать гладкие образцы и с надрезом. Сравнительные испытания этих образцов на воздухе и в 3-процентном растворе NaCl показали, что указанная среда ускоряет процессы зарождения и развития разрушения. При испытании на воздухе, как правило, зарождается и развивается одна трещина. В присутствии коррозионной среды (3-процентный раствор NaCl) даже при наличии концентраторов напряжений наблюдается многоочаговый характер зарождения и развития трещин, что значительно ускоряет процесс разрушения — в 2–2,5 раза [11–13].

В работе рассмотрен способ повышения малоцикловой усталости сварных соединений типа «штуцер — лист». Повысить долговечность предлагается уменьшением напряжений на растянутой поверхности, где

действует коррозионная среда, путем уменьшения средних напряжений в соединении [14, 15]. На рис. 5 представлено предлагаемое сварное соединение.

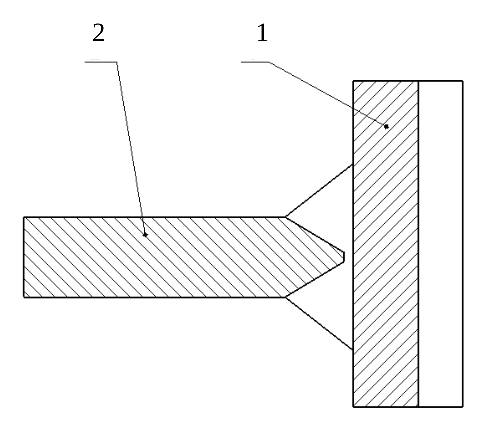
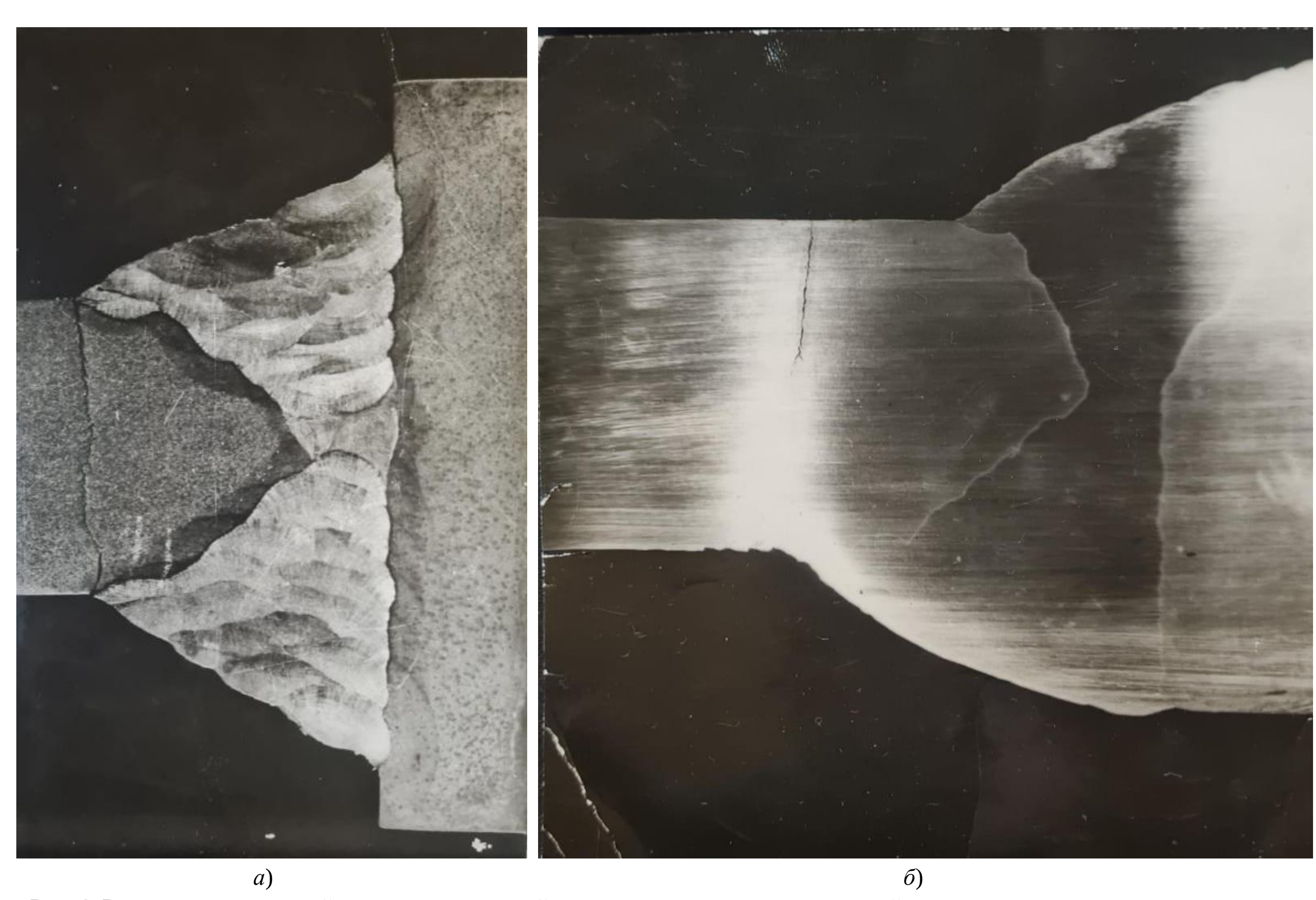


Рис. 5. Сечение сварного соединения типа «штуцер — лист»: 1 — штуцер; 2 — лист (оболочка)

Испытание образца проводили на установке УДИ-550 в 3-процентном растворе NaCl при номинальных напряжениях 850 МПа. Результаты испытаний показали, что количество циклов до зарождения разрушения увеличилось в два раза, причем трещины появились на основном металле. Фото макрошлифов результатов испытаний представлены на рис. 6.



а) *б*)

Рис. 6. Результаты испытаний сварных соединений «штуцер — лист» в коррозионной среде: *а* — штуцерное соединение с симметричными швами; *б* — штуцерное соединение с подкрепляющим швом на сжатых волокнах (фото авторов)

Анализ испытания образцов позволяет установить, что долговечность штуцерного соединения, изготовленного предлагаемым способом, оказывается больше. Кроме того, за счет подкрепляющего влияния металла шва со стороны, противоположной действию коррозионной среды, уменьшается величина максимальных растягивающих напряжений в наиболее опасной зоне, следовательно, увеличивается сопротивление зарождению и развитию разрушения [16].

Результаты исследования. Используя опыт проектирования отдельных установок и узлов, предназначенных для испытания сварных соединений в условиях двухосного изгиба, ученые ДГТУ и ЦНИИ

КМ «Прометей» разработали серию установок, предназначенных для испытания в условиях двухосного изгиба сварных соединений из листового металла толщиной 20–100 мм с пределом текучести до 15 МПа [17].

Обсуждение и заключения

1. Разработаны оборудование и методика испытаний сварных соединений типа «штуцер — лист», которые работают при двухосном осесимметричном изгибе в коррозионной среде. Это позволяет оценивать сопротивление зарождению и развитию разрушения. Большие размеры образцов и сохранение технологии сварки приближают результаты данных испытаний к оценке несущей способности натурных конструкций.

2. Для оценки целесообразности применения новых технологических или конструктивных решений необходимы испытания образцов натурной толщины.

3. Разрушение сварных соединений, выполненных по серийным (заводским) технологиям, начинается одновременно на нескольких участках вдоль линии сплавления, где имеется сочетание неблагоприятных факторов. Главную роль играют факторы местного повышения напряжений, остаточные сварочные напряжения и наличие коррозионной среды.

4. С целью повышения долговечности предложены конструкции сварных соединений с несимметричным расположением швов относительно плоскости листа, которые имеют со стороны действия растягивающих напряжений и коррозионной среды катет шва меньше, чем с противоположной.

5. Установки и методика испытаний внедрены в Китайской Народной Республике и в Республике Индия.

Список литературы

1. Leonov, V. P. Structural and Technological Strength of Steel for Marine Sstructures / V. P. Leonov, V. A. Malyshevskii // Metal Science and Heat Treatment. — 2001. — Vol. 43. — P. 444.

2. Ильин, А. В. Определение параметра трещиностойкости CTOD для металла сварных соединений судокорпусных сталей при низких климатических температурах / А. В. Ильин, В. П. Леонов, В. Ю. Филин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2009. — № 32. — С. 120–146.

3. Фетисова, Е. А. Особенности диффузионных процессов в сварных соединениях из разнородных сталей / Е. А. Фетисова, А. Г. Лупачёв // Вестник Белорусско-российского университета. — 2014. — № 3 (44). — С. 79–87. https://doi.org/10.53078/20778481_2014_3_79

4. Ilyin, A. V. On the Problem of Quantitative Service Life Assessment for High-Strength Steel Welded Structures under the Effect of Corrosion Medium / A. V. Ilyin, V. Y. Filin // Procedia Structural Integrity. — 2019. — Vol 14. — P. 964–977. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.078

5. Kazuo Tateishi. Low Cycle Fatigue Strength of Butt-Welded Steel Joint by means of New Testing System with Image Technique / Kazuo Tateishi, Takeshi Hanji // International Journal of Fatigue. — 2004. — Vol. 26. — P. 1349–1356. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.03.016

6. Ильин, А. В. Определение конструктивной и технологической концентрации напряжений в сварных узлах при оценках усталостной прочности оболочечных конструкций / А. В. Ильин, К. Е. Садкин // Вопросы материаловедения. — 2012. — № 2 (70). — С. 161–176.

7. Дудка, Д. В. Критерий шейкообразования кристаллического анизотропного листового материала при двухосном растяжении / Д. В. Дудка, С. С. Яковлев, Ю. В. Бессмертная // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2010. — № 3. — С. 108–112.

8. Евдокимов, Д. В. Оценка предельной пластичности листового материала при двухосном растяжении / Д. В. Евдокимов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2009. — № 2–2. — С. 83–88.

9. Дудка, Д. В. Локализация деформации кристаллического анизотропного листового материала при пластическом двухосном растяжении / Д. В. Дудка, С. С. Яковлев, Ю. В. Бессмертная // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2010. — № 3. — С. 85–88.

10. Зеньков, Е. В. Методика моделирования напряженного состояния деформируемых элементов транспортных систем в условиях двухосного растяжения / Е. В. Зеньков, Л. А. Багиева // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. — 2016. — № 1. — С. 342–345.

11. Контроль остаточных напряжений в околошовной зоне сварного шва / В. А. Быченок, И. В. Беркутов, А. Л. Майоров [и др.] // Технология машиностроения. — 2019. — № 12. — С. 45–50.

12. Sushanta Kumar Panda. Experimental and Numerical Studies on the Forming Behavior of Tailor Welded Steel Sheets in Biaxial Stretch Forming / Sushanta Kumar Panda, D. Ravi Kumar // Materials & Design. — 2010. — Vol. 31. — P. 1365–1383. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.046

13. Lyudmirskii, Y. G. Constructive and Technological Method of Increasing Durability of “Choke Connections” / Y G. Lyudmirskii, S. S. Assaulenko, S. O. Ageev // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2131. — Art. 042061. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/4/042061

14. Measurement and Analysis of Welding Deformation and Residual Stress in CMT Welded Lap Joints of 1180 MPa Steel Sheets / Ritsu Nishimura, Ninshu Mab, Yong Liu [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. — 2021. — Vol. 72. — P. 515–528. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.10.050

15. Evaluation of Fatigue Fracture Mechanism in a Flash Butt Welding Joint of a U75V Type Steel for Railroad Applications / Xiaohui Zhao, Yanjun Fan, Yu Liu [et al.] // Engineering Failure Analysis. — 2015. — Vol. 55. — P. 26–38. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.05.001

16. Mechanical Responses of L450 Steel under Biaxial Loading in the Presence of the Stress Discontinuity / Shuai Wang, Cheng Hou, Bin Wang [et al.] // International Journal of Pressure Vessels and Piping. — 2022. — Vol. 198. — Art. 104662. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104662

17. Biaxial Testing System for Characterization of Mechanical and Rupture Properties of Small Samples / Andrea Corti, Tariq Shameen, Shivang Sharma [et al.] // HardwareX. — 2022. — Vol. 12. — Art. e00333. https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00333

Поступила в редакцию 07.08.2022
Поступила после рецензирования 02.09.2022
Принята к публикации 02.09.2022

Об авторах:

Людмирский Юрий Георгиевич, профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ScopusID, ORCID, lyudmirskiy40@mail.ru

Ассауленко Семен Семенович, старший преподаватель кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, ORCID, assaulenko_s@mail.ru

Крамской Александр Владимирович, руководитель направления разработки контролей сварных соединений филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» (347390, РФ, г. Волгодонск, ул. Жуковское шоссе, 10), кандидат технических наук, ScopusID, ORCID, kramskoi_av@atommash.ru

Заявленный вклад соавторов:

Ю. Г. Людмирский — научное руководство, анализ результатов исследований, корректировка выводов. С. С. Ассауленко — проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов. А. В. Крамской — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, доработка текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT







Original article



https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-261-271

Describing Pulmonary Nodules Using 3D Clustering

Amera Al-Funjan [1], **Farid Meziane** [2], **Rob Aspin** [3]
[1]Babylon University, Iraq
[2]University of Derby, Derby, UK
[3] Manchester Metropolitan University, Manchester, UK
amera.alfunjan@uobabylon.edu.iq

Abstract
Introduction. Determining the tumor (nodule) characteristics in terms of the shape, location, and type is an essential step after nodule detection in medical images for selecting the appropriate clinical intervention by radiologists. Computer-aided detection (CAD) systems efficiently succeeded in the nodule detection by 2D processing of computed tomography (CT)-scan lung images; however, the nodule (tumor) description in more detail is still a big challenge that faces these systems.
Materials and Methods. In this paper, the 3D clustering is carried out on volumetric CT-scan images containing the nodule and its structures to describe the nodule progress through the consecutive slices of the lung in CT images.
Results. This paper combines algorithms to cluster and define nodule's features in 3D visualization. Applying some 3D functions to the objects, clustered using the K-means technique of CT lung images, provides a 3D visual exploration of the nodule shape and location. This study mainly focuses on clustering in 3D to discover complex information for a case missed in the radiologist's report. In addition, the 3D-Density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN) method and another 3D application (plotly) have been applied to evaluate the proposed system in this work. The proposed method has discovered a complicated case in data and automatically provides information about the nodule types (spherical, juxta-pleural, and pleural-tail). The algorithm is validated on the standard data consisting of the lung computed tomography scans with nodules greater and less than 3mm in size.
Discussion and Conclusions. Based on the proposed model, it is possible to cluster lung nodules in volumetric CT scan and determine a set of characteristics such as the shape, location and type.

Keywords: automated 3D Clustering, CT lung images, describing the nodule characteristics.

Acknowledgements. The authors would like to thank the reviewers for their suggestions that improved the article.

For citation. Amera Al-Funjan, Farid Meziane, Rob Aspin. Describing Pulmonary Nodules Using 3D Clustering. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 261–271. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-261-271

Научная статья

Описание легочных узлов с использованием трехмерной кластеризации

Amera Al-Funjan [1], **Farid Meziane** [2], **Rob Aspin** [3]
[1] Babylon University, Iraq.
[2] University of Derby, Derby, UK.
[3] Manchester Metropolitan University, Manchester, UK.
amera.alfunjan@uobabylon.edu.iq

Аннотация
Введение. После обнаружения на медицинских снимках узла (опухоли) необходимо определить его форму, локализацию и тип. Это важно для выбора вида клинического вмешательства и других аспектов работы

радиологов. Системы компьютерного обнаружения эффективно выявляют узлы с помощью 2D-обработки изображений компьютерной томографии (КТ) легких. Однако более подробное описание узла (опухоли) по-прежнему представляет собой большую проблему.
Материалы и методы. В рамках данной работы трехмерная кластеризация выполнялась на объемных КТ изображениях, которые дают представление об узле и его структуре. Эти материалы использовались для описания развития узла по последовательным срезам легкого.
Результаты исследований. Объединены алгоритмы кластеризации и определения характеристик узлов в 3D-визуализации. Некоторые трехмерные функции применили к объектам, сгруппированным методом K-средних КТ изображений легких. Такой подход обеспечивает визуальное изучение трехмерной формы и местоположения узла. Данное исследование в основном сосредоточено на кластеризации в 3D с целью получения сложной информации, пропущенной в отчете рентгенолога. Кроме того, для оценки предлагаемой системы в работе применили 3D плотностный алгоритм кластеризации пространственных данных с присутствием шума и еще одно 3D приложение — график. Предлагаемый метод обнаружил сложный случай и автоматически предоставил информацию о типах узлов (шаровидный, юкстаплевральный и плеврально-хвостовой). Алгоритм проверен на стандартных данных, состоявших из сканов компьютерной томографии легких с узлами размером более и менее 3 мм.
Обсуждение и заключения. На основе предложенной модели можно кластеризовать узлы легких при объемной КТ и определять набор таких характеристик, как форма, расположение и тип.

Ключевые слова: автоматизированная 3D-кластеризация, КТ легких, описание характеристик узлов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам за их предложения по улучшению статьи.

Для цитирования. Amera Al-Funjan. Describing Pulmonary Nodules Using 3D Clustering / Amera Al-Funjan, Farid Meziane, Rob Aspin // Advanced Engineering Research. — 2022. — Vol. 22, no. 3. — P. 261–271. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-261-271

Introduction. Lung cancer is a leading cause of death worldwide among both men and women, with an impressive rate for nearly 10 million deaths in 2021. Around one-third of deaths from cancer are to smoking and second-hand smoke. Many cancers can be cured if detected early and treated effectively (1).

Computed Tomography (CT) is one of the most commonly medical imaging techniques used in the screening of lungs by generating three-dimensional imaging modalities and shows the lesions that cannot be visualized by conventional chest X-ray. CT technology is used widely by clinicians to detect, analyze, and diagnose numerous asymptomatic disease lung diseases such as pulmonary nodules and lung cancers, that cannot be detected by other medical imaging technologies. Where, early detection of these diseases is an important of health promotion and chronic disease prevention. However, it is noted that a big challenge associated to radiologists is the analysis of huge amount of data generated by CT technology. Therefore, computer-aided diagnostic (CAD) is needed to provide a computerized diagnosis to assist clinicians for detection and interpretation of CT lung scans (2, 3). Segmentation and clustering are tasks that manipulate the medical image to extract significate information and reduce the search area of the region of interest in image components. Where, using clustering on volumetric scan of CT can provide more details about nodule shapes, characteristics, and their types which are suspected be missed by radiologists during the diagnosis. Additionally, it provides a precise description of lung's tissues with low-intensity (4, 5). The outcomes of 3D clustering can improve the precision in diagnosis of lung by identifying the nodule structures in the different levels, and the number of nodules (6, 7). This study aims to improve the accuracy of three- dimensional clustering of lung's nodules by using volumetric CT scans of lung. Where, the three-dimensional clustering efficiently can be used to observe the current nodule's progress which serves significantly the early diagnosis of lung. Furthermore, the precise details that can be extracted from the three-dimensional clustering offers a high potential to detect nodules and lesions with less than 3 mm.

Many studies focused on the possibility of developing a computer-aided system for diagnosing, detecting, and segmenting lung lesions in CT scans of lung (8). However, without using volumetric CT scans of lungs, the accurate identification and characterization of small pulmonary nodules have not been defined in the studies. Where, implementing quantitative analysis of CT scans of lungs face an obstacle due to inter-scan image intensity variations and irregular shapes of lung lesions. A major difficulty is encountered during clustering of lung's lesions because of the complex characteristics of lung's lesions and overlapping in intensity distributions in such cases. Additionally, some parts of lung's lesions may not be distinguished correctly because of the image resolution and the complexity of diagnosing lung's lesions in a visual examination. Therefore, a multi-dimensional CT scan is required to determine type and volume of lesions.

Javaid, Javid (9) proposed an automated method for segmenting and recognizing the pulmonary nodules into juxta-vascular or juxta-pleural. Where, thresholding and k-means were combined to segment lung and detect the pulmonary nodules respectively. Then, the pulmonary nodules were classified into sex groups according to percentage of connectivity with lung walls and thickness. Fetita, Preteux (10) developed a method for discriminating lung's nodules from other dense structures by using volumetric space of the thorax. Where, the achieved false positive rate was 8.5 per exam. Fetita, Preteux (10) applied a three-dimensional active contour method to segment 96 lung's nodules, then the texture features were extracted and classified into classes by a linear discriminant analysis (LDA). Ozekes and Osman (11) suggested a CAD system based on volumetric CT scans of lung to detect lung's nodules which have diameters (3.5–7.3) mm. In this study, four classifiers were used to evaluated the suggested system.

Furthermore, El-Baz, Elnakib (12) exploited the efficacy of genetic algorithm (GA) to isolate nodules, arteries, veins, bronchi and bronchioles from the surrounding anatomical structures based on volumetric and two-dimensional CT lung scans. It was proved that the lung nodules were recognized precisely when using volumetric CT scans. In this study, it was noted that the false positive rate was reduced significantly when utilizing volumetric CT scan of lung compared to two-dimensional CT scan. The achieved sensitivity and false positive rates were 82.3 % and 9.2 % respectively.

In this study, we proposed a new system to describe automatically lung's lesions in volumetric CT scans, as well as, determining the nodule numbers, type location, shape, progress of lesion. The main contribution of this study is to discriminant the complicated lung's nodules that have non seen through the clinical routine. A successful system can improve the accuracy of the diagnosis process. The following research objectives focus on how the above aim will be achieved:

– to extract the most distinct characteristics of the lung's nodule to that helps to determine treatment decisions and predict expected outcomes;

– to detect the complicated lesions cases that cannot be identified with certainty by radiologists;

– constructing an efficient CAD system that can determine precisely lung's nodules number and types.

The rest of this paper is organized as follows. In Section 2, material and method will be described and the conclusion will be discussed in Section 3.

Materials and Methods. The core-aim of the present study was to build an automated algorithm of clustering nodules from CT lung scans in an axial plane. The proposed algorithm is divided into three stages as shown in Fig. 1. First, the CT lung scan undergoes an enhancing process and separating of lung from background in the pre-processing stage. Then, the CT lung scan is clustered in 2D and 3D for detecting the vessel and nodules from normal tissue in the post-processing stage, as well as reducing the area region about nodules in 2D clustering while describes the nodule shape in 3D clustering. The results of 3D clustering are evaluated using two ways (3D-DBSCAN method and Plot.ly application). The evaluation stage confirms the outcomes precision of previous stage (post-processing) in detecting the number and shape of nodules that founded in the complex case, which is recorded in radiologist's report.

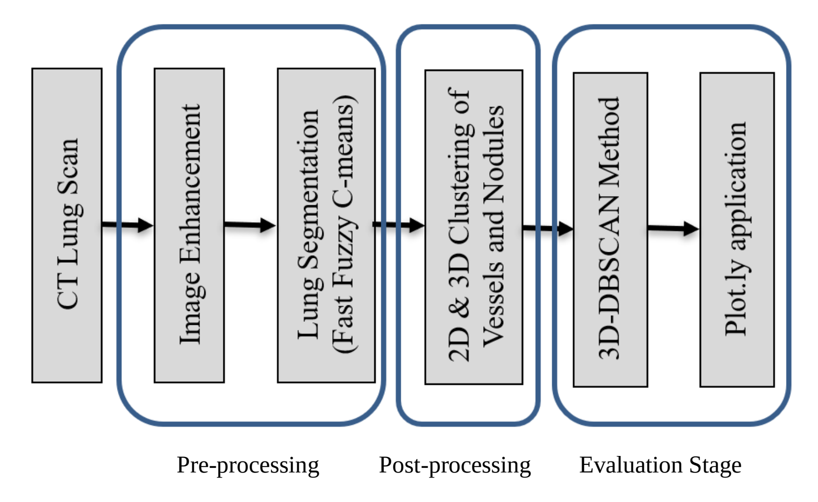
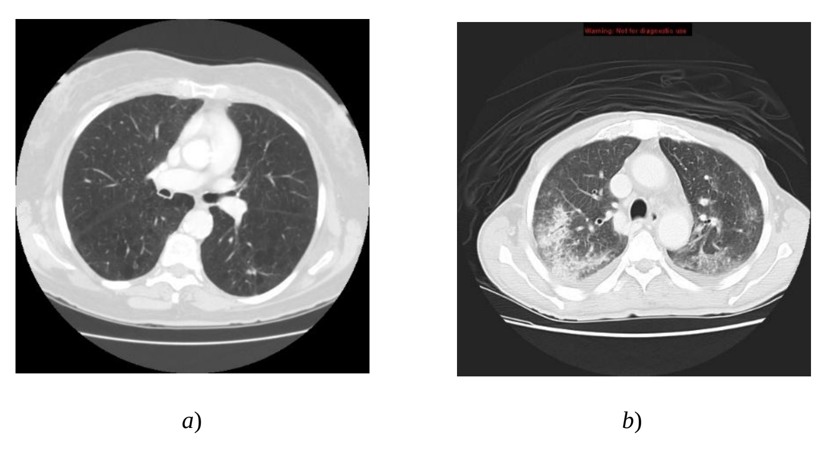


Fig. 1. The Proposed Model of Lung CT scan Clustering

Data Collection This study included 85 lung CT scans with pulmonary nodules, were downloaded from the TCIA (Cancer Imaging Archive) website (13). The provided data was annotated and screened by four radiologists to determine and extract the diagnostic details of lung's nodules such as number, size, location, volume, diameter, type of

lung's nodules. In addition to slice number of the pathological lung. Figure 2, shows samples of CT lung scans form the provided dataset in axial viewing.



a) *b*)

Fig. 2. Lung CT slices in the axial view: *a* — healthy CT lung scan; *b* — pathological CT lung scan

Pre-processing of Lung CT Scan. To reconstruct the CT images, a million of independent detectors are used to collect the x-ray signals. Subsequently, the CT artifacts may be occurred during the reconstruction process. Where, these artifacts cause intensity variations across consecutive re-constructed CT scan slices. Therefore, the lung CT scans are pre-processed by implementing a set of algorithms such as image enhancement by gaussian filter, intensity normalization by histogram normalization method, lung extraction by thresholding (1, 14) as shown in Fig. 3.

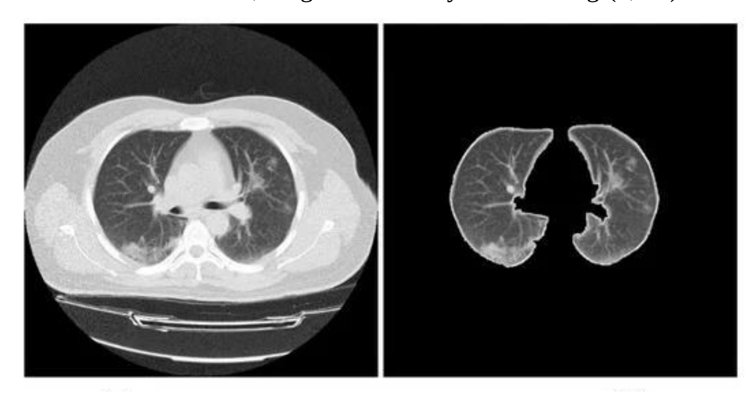


Fig. 3. Lung boundary identification samples: *a* — Original CT image; *b* — Preprocessed CT image

Three-dimensional Clustering. In this step includes implementation of a set of image pre-processing methods to prepare the CT scans of lung more appropriate for implementing the K-mean clustering method. Where, reduction of parenchyma tissue was achieved by isolating the intensity values that represents the vessels and nodules together. Then, vessels and lung's nodules were separated by implementing the K-mean clustering method on each CT image separately. It is an efficient and non-supervised technique that allows the cluster center to shift and fit the ROI (15–17). Subsequently, any hole appearing in the clustered CT scan of lung is removed by implementing a set of morphological operations (1). Then, the clustered CT images of each patient were stacked into single a volumetric CT scan and underwent the 3D graphics functions later.

Finally, a three-dimensional volume reconstruction from cross-sectional CT scans is determined by using isosurface function which was provided by MATLAB and used to measure the geometric computations of clustered data, and improved volumetric visualization of objects. Where, pixel coordination (x,y,z) and intensity values of pixel of each cross-sectional clustered scan was given as input to the function. Moreover, isocaps and isonormal functions were used to enhance produced the three-dimensional representation of the lung's nodules and vessels. Consequently, the three-dimensional clustering stage detects nodules, shape, type, and progress and finds out the unseen lesions in the CT scan of lung. The suggested algorithm was applied to cluster nodules and vessels in volumetric CT scan of lung.

First step was the threshold, where each value of the intensity in the volumetric CT scans by a specific value to extract correctly the lung's nodules from the CT scan of lungs by using Eq. 1.

$$G(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{if } P(x,y) > T \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

Where, $P(x,y)$ indicates the intensity values representing the nodules and vessels which are greater than the threshold value which is set experimentally.

The second step used K-means clustering on each CT lung images individually to eliminate any undesirable holes that occurred in the clustering process. The output of clustering process was labelling pixels of CT images into two main clusters (nodules and vessels). K-means clustering implemented by using the following steps.

1. Initialize k to specify cluster center, C=c_1, c_2,..c_k.

2. Determining the distance between CT lung image's pixels and the cluster centers by using Eq. 2:

$$S = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} || x_i - c_j ||^2 \quad (2)$$

where, x_i is an intensity pixel associated with m and n coordinates.

3. Assigning the CT lung's pixel with minimum distance to the nearest cluster's center.

4. Updating the cluster centers according to Equation (3):

$$C_i = \frac{1}{N_{i,j}} \sum_{j=1}^{N_{i,j}} x_{i,j} \quad (3)$$

where, c_i and $N_{i,j}$ indicate the i^{th}cluster center, and all pixels of the i^{th} cluster respectively. While, $x_{i,j}$ signifies all pixels of i^{th} cluster center.

5. Repeating steps 2 to 4 until minimizing the objective function S to the lowest value.

Finally, implemented a three-dimensional function on the labelled clusters of CT images to generate the volumetric data. Where, the volumetric data was plotted according to a set of calculations. The following procedure was used to combine the labeled clusters and produce lung's nodule's shape and type (18). Algorithm 1 shows the pseudo-code for the generating of volumetric lung's nodule steps.

```
Algorithm 1: Pseudo-code for generating of volumetric lung's nodule.
   Input: Clustered image (x.y.z).
   Output: Output volumetric figure (i,j,k).
   Begin
       Apply Isosurface function to present a volume visualization.
       Apply Isocaps function to adjust colors of faces of the produced volumetric lung's nodules.
       Apply Azimuth and Elevation functions to create axes in three-dimensional view.
       Apply Isonormals to determine the normal vertices and create a surface shadow through
             vertices gradient.
```

Results. The plotted three-dimensional space of lung's nodules enhanced visualization of nodules and vessels and provided more descriptions on the lung's nodules than what extracted by two-dimensional space. Where, the former provides more details regarding shape and locations of lung's nodules. Figure 4, shows an example of pathological lung that has two nodules with a red referral that are appear between slices no. 60 and 64. After implementing the three-dimensional clustering, a thin tissue between lung's nodules that is invisible by two-dimensional clustering, becomes visible to the radiologists. Furthermore, it extends through CT slices no. 61 to 63. Therefore, by depending on the two-dimensional clustering leads to make the inspection process by the radiologist prone to error and may diagnose one lung's nodule as two separated nodules.

Moreover, the proposed system provides more details about the lung's nodule type. Where, each lung's nodule was classified into juxta-vascular and juxta-pleural nodules. Figure 5, reveals how an early lung's nodule was detected and notified and this will help the clinicians to improve patient survival rates. Figure 6 shows how the lung's nodules are connected through their center pixels.

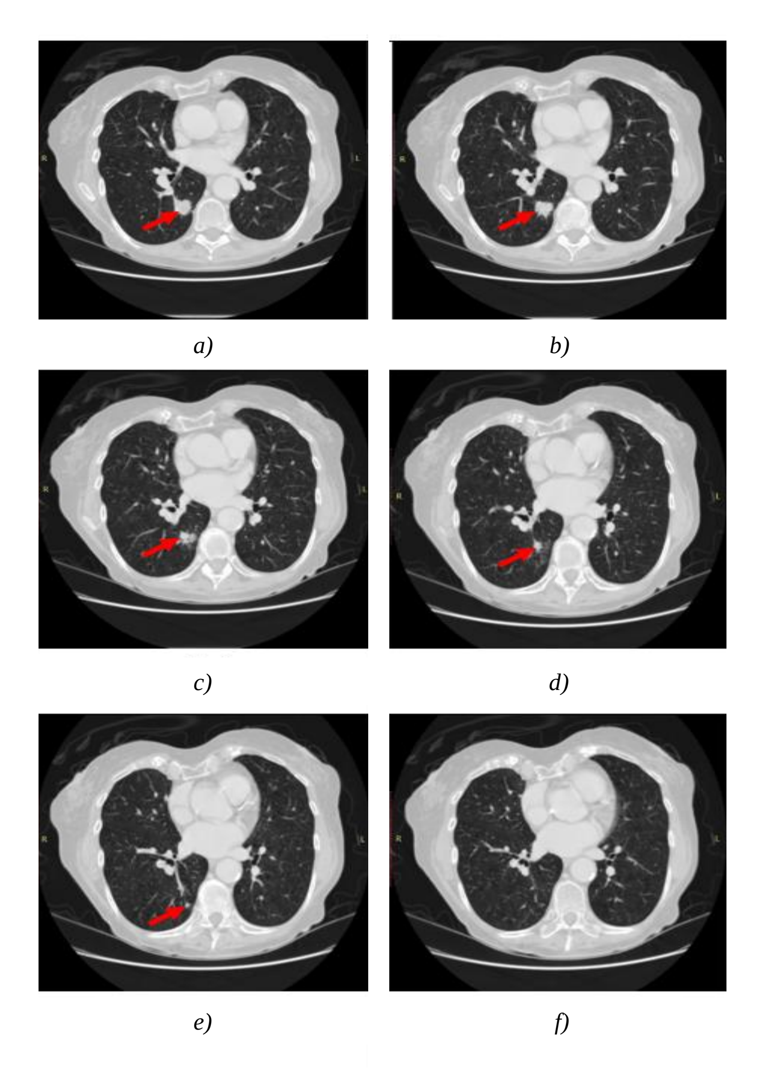


Fig. 4. Original CT Lung scan between Slice 60 and 64 with a Red arrow to indicate Two Attached Nodules: *a* — Candidate Nodule in the 60th slice; *b, c, d* — lung Nodules through slices 61, 62, 63; *e* — Nodule in slice 64; *f* — Normal slice after slice 65

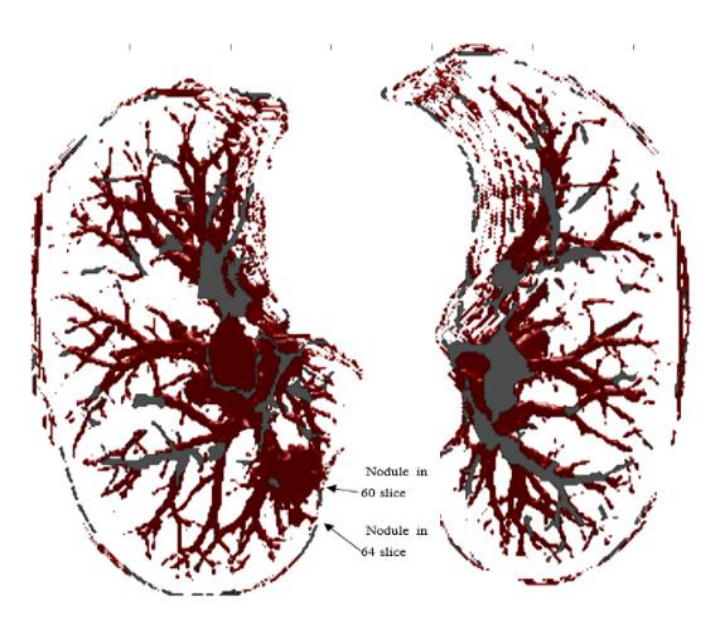


Fig. 5. Three-dimensional Clustering of CT lungs Attached Nodules in 60th and 64th Slices

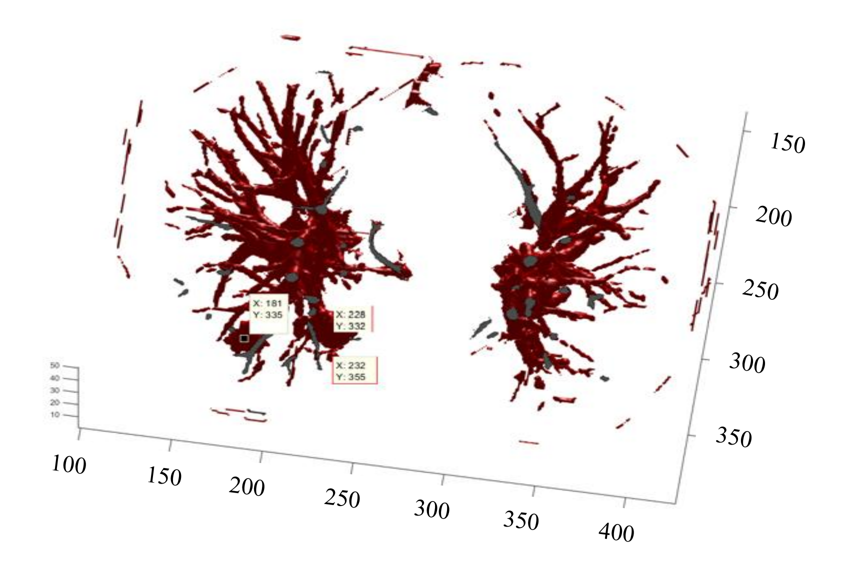


Fig. 6. Three-dimensional Clustering of two lung nodules that are located in different slices

Although the three-dimensional graphic is evaluated visually, it is essential to evaluate quantitively the quality of the achieved results. The Density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN) method and 3D plot.ly application were used to evaluate the performance of the proposed three-dimensional clustering method (19, 20).

The DBSCAN method is one of the most popular and standard clustering techniques (21–23). It was used to set of nearby pixels are grouped to gather into a single cluster, and isolate the outlier pixels in a low-density area. The clustering process of this method depends on two key parameters (Epsilon and MinPts) that deal with core point in the volumetric space. Where, Epsilon is the distance that specifies the neighborhoods. Two points are considered to be neighbors if the distance between them is less than or equal to eps. While, MinPts represents minimum number of data points to define a cluster. Then, a point is considered as a core point if there are at least MinPts number of points (including the point itself) in its surrounding area with radius eps.

DBSCAN method was modified to cluster the volumetric CT lung scans to compare its output with the proposed system in this study by comparing the cluster's centers that were achieved by both methods. Where, DBSCAN inspects and connects all objects to the core pixels based on eps and MinPts measures. Synchronously, all the points that do not represent core points are ignored. Many advantages are achieved by using this method, first, no need to initialize cluster numbers like k-means cluster method. Secondly, random shaped clusters are discovered easily. Finally, if the data is fully understood, it is easily to specify the MinPts and ets parameters.

Fig. 7 shows how the lung's nodules were linked through CT slices. Where, the 3D-DBSCAN method evaluated the connection between attached nodules compare with the clustered lung's nodules of the proposed system in this study. It is noted that the center's pixels were approximately matched as shown in Fig. 8. Fig. 9, shows how the lung's nodules were linked and spread by a thin line between CT slices no. 60th and 64th.

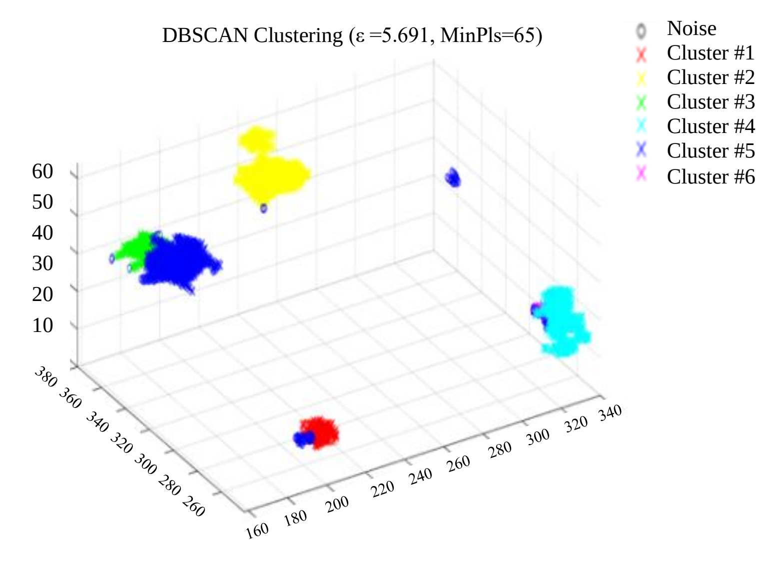


Fig. 7. 3D-DBSCAN clustering Method, yellow cluster refers to Linked Nodules, and other colors refer to the Remaining Nodules of the Same Patient

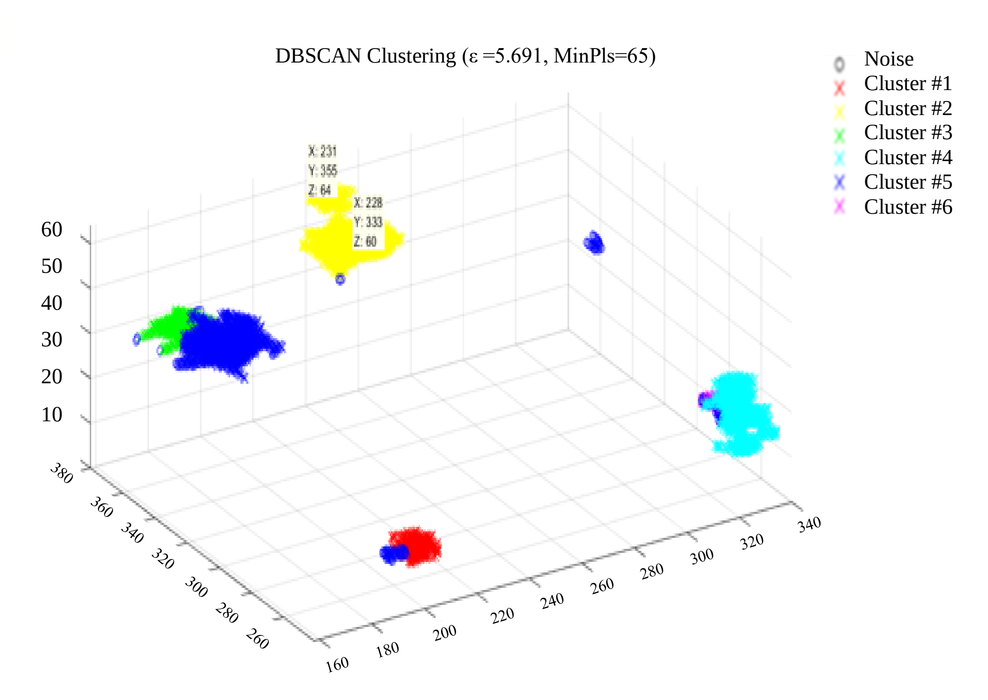


Fig. 8. 3D-DBSCAN clustering Method, yellow cluster refers to the Linked Nodules, Centers Pixels were recognized by Radiologist, and other colors refer to the Remaining Nodules

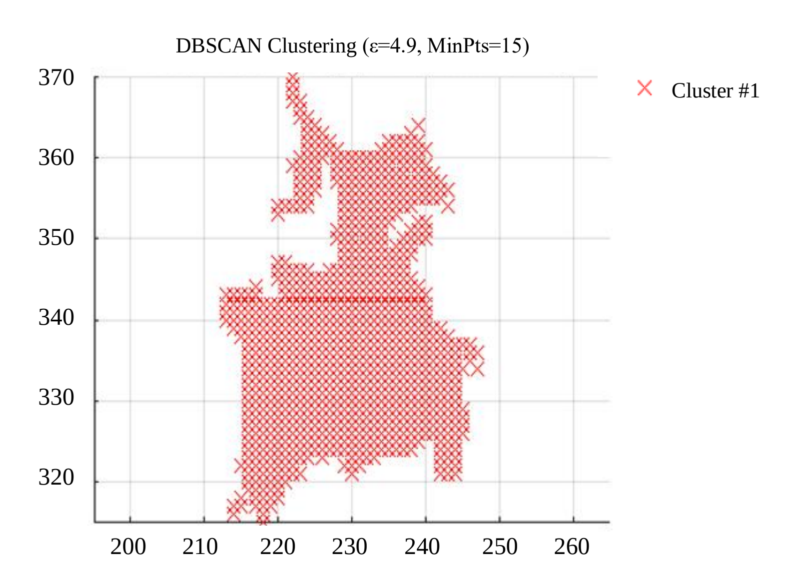


Fig. 9. DBSCAN Method Just Clusters the Linked Nodules and Proves One Nodule

Another 3D application was utilized in this study to evaluate the proposed system. It is named plot.ly application. This application used colored bubbles to locate pixels within the candidate nodule and its structures in different slices, as shown in Fig. 10 and Fig. 11. It was initialized by the coordinates of lung's nodules centers and it extended consecutively through similar structures in neighbor CT slices. Moreover, it was essentially to initialize pixel size and pixel spacing of CT scan, which are determined by Eq. 4 and Eq. 5.

$$\text{Pixel spacing}(\text{x}-\text{size}, \text{y}-\text{size}) = \left(\frac{(\text{Field of view(FOV)})}{(\text{Matrix Size})}\right)^2 = \left(\frac{360mm}{512}\right)^2 = 0.703^2 \quad (4)$$

$$voxel\ size = pixel\ spacing(x-size) \times pixel\ spacing(y-size) \times thickness = 0.703 \times 0.703 \times 2.5 = 1.235 \quad (5)$$

Where x and y indicate the distance from the center of one pixel to the center of an adjacent pixel in the X and Y axes respectively. It is determined by squared ratio of the CT image field of view to the image array size (512×512). The image parameters of the provided dataset; pixel spacing, thickness, and voxel size were (0.703/0.703), 2.5 and 1.235 respectively. Fig. 12, shows the centered pixels of lung's nodules were labeled with two colors: red and green that represented actual center that was recognized by radiologist and the determined center by the proposed system. The black and blue colors show the overlapped area between clusters in different slices, and the remaining pixels of the cluster areas respectively. Generally, the plotted volumetric lung's nodules by the Polt.ly application and 3D-DBSCAN

methods proved the efficacy of the suggested system in this study. Where, all used methods described accurately the connected regions between linked nodules in CT lung scans.

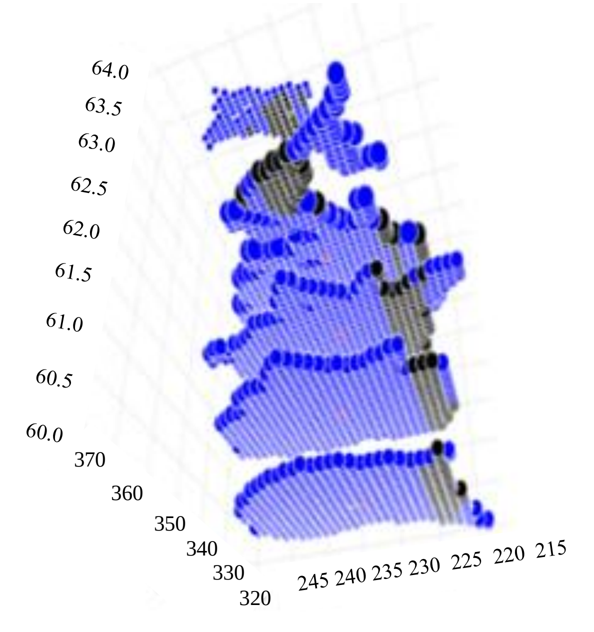


Fig. 10. Three-dimensional Plot of lung's Nodules was distributed on Different Levels from Slice 60 to 64

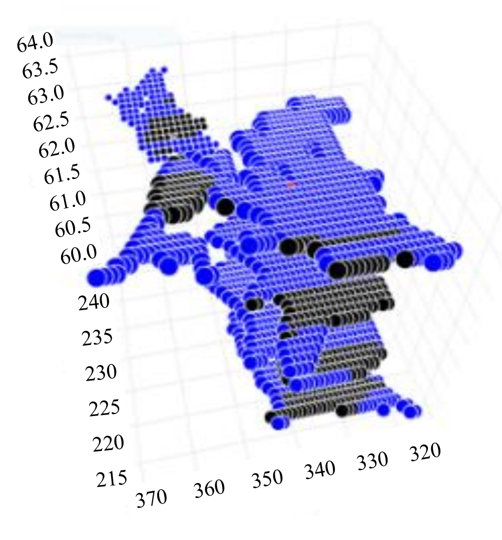


Fig. 11. Three-dimensional Plot of lung's nodule of the same case in Fig.10 but from different view, Black Bubbles Represent the Overlapping between Nodules to Show the Connected Regions

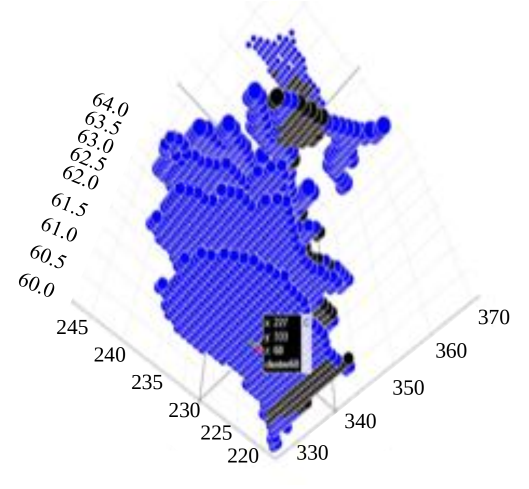


Fig. 12. The Overlapping between Centre Pixels of Clustered and Actual Nodule in the 60 Slice with Two Colors Red and Green Respectively

Discussion and Conclusions. The main objective of this paper was to build and implement a fully automated algorithm to describe the pulmonary nodules in CT lung images regarding shape and location matching the radiologist's report. The proposed method could cluster the nodules and showed their shape, location, type, and progress within the lung organ. The final algorithm outcomes and case study were evaluated by other 3D clustering methods emphasizing the accurate research results. This work is performed within several stages, with different methods are used for this purpose. Firstly, threshold and K-means clustering segment the nodules and vessels of CT lung images as objects with high intensity in 2D images. With 3D function, the 2D clustered images are stacked to display the nodule progress in 3D view. The algorithm results were validated by matching the center pixels of detected nodules by 3D Clustering and actual nodules reported by radiologists. In addition, the study identified a complicated case in the data, which is suspected the radiologists may miss because it was invisible. In this case, the algorithm proves and shows an attachment between two nodules making the nodules as one nodule against the radiologist's report. The evaluation stage has been done by applying the 3D-DBSCAN and 3D application methods, which confirm the proposed method results precision for this work. The Clustering of 3D-DBSCAN demonstrates the number and location of nodules and reflects the nodule shape as far as to describe the type of nodule. Also, determining this case confirms the work abilities in the early detection of nodules, which provides a chance for recovery patient. Our algorithm has a promising result on the standard data of CT scan images in detecting the number and location of nodules, which correspond to radiologist report, and automatically providing nodule shape and type.

References

1. Hasan AM, AL-Jawad MM, Jalab HA, et al. Classification of Covid-19 Coronavirus, Pneumonia and Healthy Lungs in CT Scans Using Q-Deformed Entropy and Deep Learning Features. Entropy. 2020;22:517.

2. Magdy E, Zayed N, Fakhr M. Automatic Classification of Normal and Cancer Lung CT Images Using Multiscale AM-FM Features. International Journal of Biomedical Imaging. 2015;2015. http://dx.doi.org/10.1155/2015/230830

3. Hasan AM, Meziane F, Jalab HA (eds). Performance of Grey Level Statistic Features versus Gabor Wavelet for Screening MRI Brain Tumors: A Comparative Study. International Conference on Information Communication and Management (ICICM); 2016; UK: IEEE.

4. El-Bana S, Al-Kabbany A, Sharkas M. A Two-Stage Framework for Automated Malignant Pulmonary Nodule Detection in CT Scans. Diagnostics. 2020;10:131. http://dx.doi.org/10.3390/diagnostics10030131

5. Valente IRS, Cortez PC, Neto EC, et al. Automatic 3D Pulmonary Nodule Detection in CT Images: A Survey. Computer Methods and Programs in Biomedicine. 2016;124:91–107. https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2015.10.006

6. Lederlin M, Revel M-P, Khalil A, et al. Management Strategy of Pulmonary Nodule in 2013. Diagnostic and Interventional Imaging. 2013;94:1081–1094. https://doi.org/10.1016/j.diii.2013.05.007

7. Netto SMB, Silva AC, Nunes RA, et al. Automatic Segmentation of Lung Nodules with Growing Neural Gas and Support Vector Machine. Computers in Biology and Medicine. 2012;42:1110–1021. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2012.09.003

8. Ma Z, Tavares JMR, Jorge RN (eds). A Review on the Current Segmentation Algorithms for Medical Images. Proceedings of the 1st International Conference on Imaging Theory and Applications (IMAGAPP); 2009.

9. Javaid M, Javid M, Rehman MZU, et al. A Novel Approach to CAD System for the Detection of Lung Nodules in CT Images. Computer Methods and Programs in Biomedicine. 2016;135:125–139. https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2016.07.031

10. Fetita CI, Preteux F, Beigelman-Aubry C, et al. (eds). 3D Automated Lung Nodule Segmentation in HRCT. International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention; 2003: Springer.

11. Ozekes S, Osman O. Computerized Lung Nodule Detection Using 3D Feature Extraction and Learning Based Algorithms. Journal of Medical Systems. 2010;34:185–194. https://doi.org/10.1007/s10916-008-9230-0

12. El-Baz A, Elnakib A, El-Ghar A, et al. Automatic Detection of 2D and 3D Lung Nodules in Chest Spiral CT Scans. International Journal of Biomedical Imaging. 2013;2013:517632. https://doi.org/10.1155/2013/517632

13. Bloch BN, Jain A, Jaffe CC. Data From BREAST-DIAGNOSIS. In: Archive TCI, ed. http://doi.org/10.7937/K9/TCIA.2015.SDNRQXXR2015

14. Hamid A Jalab, Rabha W Ibrahim, Ali M Hasan, et al. Medical Image Enhancement Based on Statistical Distributions in Fractional Calculus. IEEE Computing Conference 18-20 July 2017. United Kingdom, London; 2017.

15. Peter VJ, Karnan M. Medical Image Analysis Using Unsupervised and Supervised Classification Techniques. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2013;3:40–45.

16. Rajaraman A, Ullman JD. Mining of Massive Datasets. Cambridge University Press; 2011.

17. Celebi ME, Kingravi HA, Vela PA. A Comparative Study of Efficient Initialization Methods for the K-Means Clustering Algorithm. Expert Systems with Applications. 2013;40:200–210. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.07.021

18. Smith ST. MATLAB: Advanced GUI Development. Dog Ear Publishing; 2006.

19. Bankman I. Handbook of Medical Image Processing and Analysis. Elsevier; 2008.

20. Papademetris X, Joshi A. An Introduction to Programming for Medical Image Analysis with the Visualization Toolkit. Yale University. 2006;283.

21. Sander J, Ester M, Kriegel H-P, et al. Density-Based Clustering in Spatial Databases: The Algorithm GDBSCAN and Its Applications. Data Mining and Knowledge Discovery. 1998;2:169–194.

22. Kriegel HP, Kröger P, Sander J, et al. Density-Based Clustering. Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery. 2011;1(3):231–240. https://doi.org/10.1002/widm.1343

23. Schubert E, Sander J, Ester M, et al. DBSCAN Revisited, Revisited: Why and How You Should (Still) Use DBSCAN. ACM Transactions on Database Systems (TODS). 2017;42(3):1–21. https://doi.org/10.1145/3068335

Received 08.08.2022
Revised 29.08.2022
Accepted 30.08.2022

About the Authors:

Al-Funjan, Amera, Lecturer in Mathematics Department, College of Pure Sciences, Babylon University (PO Box 4 Hilla City, Babylon, 51001, Iraq). Ph.D, ResearcherID, ORCID, amera.alfunjan@uobabylon.edu.iq

Meziane, Farid, College of Science and Engineering, School of Computing and Engineering, University of Derby (DE22 1GB, Derby, UK), Ph.D, ScopusID, ORCID, f.meziane@derby.ac.uk

Aspin, Rob, Deputy Head, Manchester Metropolitan University, (M15 6BH, Manchester, UK), Ph.D, ScopusID, ORCID, R.Aspin@mmu.ac.uk

Claimed contributorship:

A. Al-Funjan: conception, design and drafting the manuscript and acquisition of data and analysis. F. Meziane: interpretation, revision and proofreading. R. Aspin: formal analysis.

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT





Check for updates

UDC 625.7/8
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-272-284

Original article

Evaluation of Pavement Condition Deterioration Using Artificial Intelligence Models

Mohamed Mostafa Mahmoud Elshamy[1,2], **Artem N. Tiraturyan**[1] ✉, **Evgeniya V. Uglova**[1], **Mohamed Zakaria Elgendy**[2]
[1]Don State Technical University, 1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, Russian Federation
[2] Al-Azhar University, 1, Al Mokhaym Al Daem St., Cairo, Nasr-City, Arab Republic of Egypt
✉ tiraturjan@list.ru

Abstract
Introduction. One of the most significant tasks facing road experts is to maintain the transport network in good condition. The process of selecting an appropriate approach to providing such condition is quite complex since it requires considering many parameters, such as the existing condition of the pavement, road category, weather conditions, traffic volume, etc. Recently, the rising trend of digitization in the industry has contributed to the use of artificial intelligence to address problems in several fields, including the bodies in charge of operational control over the status of roadways. Within the context of any control system, the main task of the control system is to carry out reliable forecasting of the operational state of the road in the medium and long term.
Materials and Methods. This study investigated the possibility of using artificial neural networks to assess existing pavement characteristics and their potential application in developing road maintenance strategies. A back-propagation neural network was implemented, trained using data from 1,614 investigated sections of the M4 "DON" highway in the road network of the Russian Federation in the period from 2014 to 2018. Several models were developed and trained using the MATLAB application, each with a different number of neurons in the hidden layers.
Results. The results of the models showed a convergence between the inferred paving state values and the actual values, as the multiple correlation coefficient (R^2) values exceeded 92 % for most of the models during all learning stages.
Discussion and Conclusions. The findings suggest that public road authorities may utilize the established models to choose the best road maintenance strategy and assign the most efficient steps to restore road bearing capacity and operation.

Keywords: artificial neural network, back-propagation algorithm, falling weight deflectometer test, pavement maintenance, pavement management system.

Funding information. The research is done on the grant of President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – candidates of science (application МК–242.2022.4). Researcher Mohamed Mostafa Elshamy is funded by a fellowship under the executive program between the Arab Republic of Egypt and the Russian Federation. They have his thanks and appreciation.

For citation. M. M. M. Elshamy, A. N. Tiraturyan, E. V. Uglova, M. Z. Elgendy. Evaluation of Pavement Condition Deterioration Using Artificial Intelligence Models. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 272–284. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-272-284

Научная статья

Оценка ухудшения состояния дорожного покрытия с использованием моделей искусственного интеллекта

М. М. М. Елшами[1,2], **А. Н. Тиратурян**[1] ✉, **Е. В. Углова**[1], **М. З. Елгенди**[2]
[1] Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
[2] Университет Аль-Азхар, Арабская Республика Египет, г. Каир, Наср-Сити, ул. Аль-Мохайм Аль-Даем, 1
✉ tiraturjan@list.ru

Аннотация

Введение. Одной из важнейших задач, стоящих перед специалистами-дорожниками, является поддержание транспортной сети в нормативном состоянии. Достаточно сложно выбрать адекватный подход, обеспечивающий достижение таких целей. Для этого, в частности, необходимо учесть такие параметры, как: текущее состояние дорожной одежды, категория дороги, погодные условия, интенсивность движения. Цифровизация отрасли, внедрение интеллектуальных систем дают результаты, которые можно применить в практике организаций, контролирующих состояние автомобильных дорог. Суть работы системы управления — достоверное прогнозирование эксплуатационного состояния автомобильной дороги в средней и долгосрочной перспективе.

Материалы и методы. Изучается возможность использования искусственных нейронных сетей для оценки дорожных одежд, в том числе при разработке стратегий технического обслуживания дорог. Реализована нейронная сеть обратного распространения, обученная по данным 1614 участков трассы М-4 «Дон» с 2014 по 2018 год. С помощью программы «Матлаб» (Matlab) построены и обучены модели с разным количеством нейронов в скрытых слоях.

Результаты исследования. Результаты моделирования показали сходимость предполагаемых и фактических показателей, описывающих состояние дорожной одежды. Значения множественного коэффициента корреляции (R^2) превышали 92 % для большинства моделей на всех этапах обучения.

Обсуждение и заключения. Итоги научных изысканий позволяют утверждать, что организации, управляющие объектами дорожно-транспортной инфраструктуры, могут задействовать представленные модели в своей работе. Такие решения помогут составить оптимальные планы по содержанию дорог, спрогнозировать эффективность мероприятий по восстановлению их несущей способности и эксплуатационного состояния.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, алгоритм обратного распространения, дефлектометр падающего веса, дорожное покрытие технического обслуживания, система управления дорожным покрытием.

Финансирование. Исследования проводились в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (заявка МК-242.2022.4). Работа Елшами Мохамеда Мостафы финансировалась за счет стипендии в рамках исполнительной программы между Арабской Республикой Египет и Российской Федерацией. Автор благодарит их за поддержку.

Для цитирования. Оценка ухудшения состояния дорожного покрытия с использованием моделей искусственного интеллекта / М. М. М. Елшами, А. Н. Тиратурян, Е. В. Углова, М. З. Елгенди // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 3. — С. 272–284. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-272-284

Introduction. Road infrastructure is one of the resources that are vital to any community, so it is necessary to think about ways to maintain its efficiency. However, roads deteriorate over time as a result of being subjected to various deterioration mechanisms [1]. As a result, it is essential to manage these resources strategically to maximize their service life and technical indicators while also lowering maintenance costs [2].

Pavement management systems (PMS) aid in the maintenance of pavement performance at an appropriate level for use and provide a variety of financial and social advantages. Moreover, it contributes significantly to the cleanliness of the surroundings during the usage or maintenance [3]. Accordingly, if the condition of the pavement network is allowed to deteriorate, the damages will not only increase the costs of road maintenance to raise their efficiency. But, it will cause environmental harm due to emissions and traffic noise, as well as expose travelers to the hazards of automobiles travelling on rough roads [4].

Due to the significant damage caused by the deterioration of roads, transportation agencies in various countries allocate a large part of their annual budget to the maintenance or rehabilitation of these damaged roads. The importance of maintenance planning work is to choose the appropriate time and method to reduce the rate of deterioration of

pavement sections according to the available budget. To reach this goal, it is required to develop models that help improve the development process and take into account the factors affecting the maintenance decision making [5].

Multi-criteria models are commonly used in complicated decision-making situations, like those involving the network-wide maintenance of road infrastructure [6]. Multi-criteria models emerge as a scientific approach for evaluating multiple alternative interventions in the framework of road rehabilitation, taking into account the properties of pavement sections [7].

It is well recognized that a pavement's surfacing behavior reflects its condition; for this reason, pavement administrations depend on knowing the value of the PCI index through the process of visual inspection of the roads periodically in order to extend the life of the pavement and improve service levels [8]. The value of the pavement condition coefficient is one of the most significant factors based on which the most appropriate method of maintenance is determined, in addition to other factors, such as weather factors and traffic volume.

Over the last two decades, it has become clear that traditional knowledge of road maintenance is not enough, and there is an urgent need to develop new methods that help collect and process data for use in pavement management [9]. Due to the rapid development in the domains of information technology and artificial intelligence networks, many opportunities have been provided to find solutions to many problems in various fields, including road engineering.

Artificial neural network models are an application of the field of artificial intelligence used to solve non-linear geometric models, such as forecasting, recognition, and estimation of different patterns [10]. Artificial neural network models mimic the human brain's ability to solve issues using previous experiences. As a result, we can use this approach for choosing the most appropriate way to maintain the road after calculating its current or future condition instead of relying on human experience and knowledge.

Artificial neural networks (ANN) review:

Many studies focused on the possibility of using the artificial neural networks approach to determine the current and future state of the pavement to using it in the development of pavement management systems and determining the method of maintenance. We will mention some of these studies as follows:

R. Kumar, et al. created a neural network model for determining the condition rating of flexible pavements depending on pavement distress data collected. The study result appeared that the neural network was able to calculate pavement condition rating accurately [11].

Hamdi, et al. built an artificial neural network model using distress data generated from a visual assessment method to determine the Surface Distress Index. The positive modeling results showed that it could be used to determine the SDI coefficient [12].

After the results of the ANN models showed superiority in predicting the values of the pavement condition, many researchers were interested in developing models that can predict the values of pavement distress as an indicator of the pavement condition.

D. T. Thube used a neural networks approach to construct four models to predict pavement defects (cracking, rut depth, roughness, and raveling) as pavement condition indicators. The small differences between the observed and calculated distress values were evidence of the model's success [13].

L. Yao, et al. used a neural network approach to construct five models that predict five indicators of pavement distress: the transverse crack index, the skid-resistance index, roughness, the rut index, and pavement surface distress. The results of the models showed an acceptable performance in predicting the condition of the pavement, with an average testing R^2 of 0.8692 [14].

A. Shtayat, et al. [15], M. Mazari and D. D. Rodriguez [16] studied the possibility of predicting the International Roughness Index (IRI) based on distress data or different pavement performance indicators, such as traffic coefficients and structural properties of pavement through neural network models or combined with gene expression programs or regression analysis. However, the results of neural network models showed an acceptable superiority compared to other methods.

A. M. Mosa suggested a neural network-based approach for diagnosing pavement distresses and optimizing solutions for maintenance techniques suggestions. The created system supplied the optimal solutions taking into consideration technological, economic, and environmental requirements [17].

The results of the mentioned literature review showed the ability of neural network models to represent the complex and nonlinear relationship between several variables. Therefore, it can contribute to solving road engineering problems. We also note the use of most previous studies of ANN models with an inverse propagation logarithm, and we will mention a summary of them in the following section.

Description of back-propagation artificial neural networks:

The back-propagation algorithm is one of the most widely utilized algorithms of artificial neural network models. It has a high capacity and speed in processing new data after conducting several iterations for a set of data during the education stage [18, 19].

The structure of the back-propagation algorithm for artificial neural networks consists of three or more layers, including the input layer, the output layer, and one or more hidden layers, as shown in Figure 1. The function of the neurons inside the input layer is to receive data and then pass it through the hidden layers, which have the ability to examine the correlations between variables and process the data to the output layer, which provides the results by the neurons in it [20] .

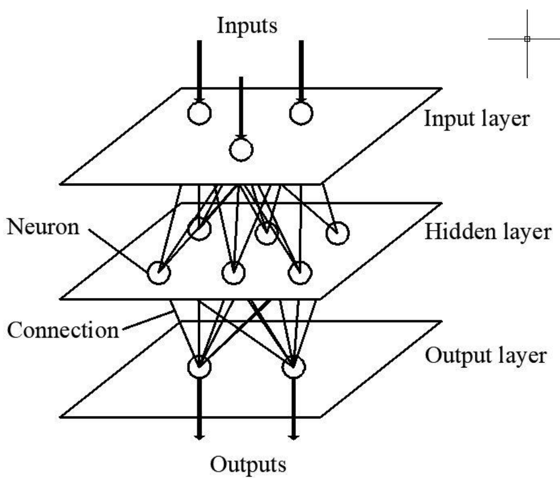


Fig. 1. Artificial Neural Network Construction Layers

In order for the neural network to perform the function assigned to it, the data must pass through three stages. The first is the process of training the network, in which it understands the effect of each variable and its relationship to other variables. Then we move on to the second stage, which is the validating process of the model, and finally, the network testing stage [21].

The back-propagation approach employs supervised learning, which implies that we supply examples data for the inputs and outputs to the network for learning [22]. The model assumes random weights for each variable and then passes the data forward to calculate the output. After calculating the difference between the computed output and the target values during the back pass, the weights are adjusted again to reduce the error rate and return the data from the output layer through the hidden layer to the input layer. The described learning process is repeated several times until the learning process is stopped when the error reaches an allowable value [19].

The weights determined during the training phase are employed in the testing process to calculate the output of a new input data set that was not used during the learning process. An evaluation of the ANN model is based on the amount of computed error.

The research scopes:

The study aims to use the field of artificial intelligence to build a model that helps engineers or decision-makers who prepare a road maintenance map to know the condition of the pavement without the need to conduct a periodic visual inspection. This reduces the dangers to individuals in charge of the examination process, as well as the effort, time, expense associated with it, and the errors that occur throughout the measuring procedure. To achieve this goal, we utilized the values of the deflection measurements coming from the falling weigh deflection test and the pavement condition index values from the Russian Road Company project for developing the M4 highway between the periods from 2014 to 2018. We prepared a database for training and testing artificial neural network models by MATLAB software. The importance of this research is to accurately describe the future condition of the asphalt pavement to use the appropriate maintenance method to slow down the rate of asphalt deterioration.

Materials and Methods

Preparation of the database:

The data obtained for constructing the ANN model were collected from a study carried out by the Russian Road Corporation for developing the M4 highway between Moscow and Krasnodar. The available data includes inspection date, air temperature, asphalt layer thickness, base layer thickness, traffic volume, and precipitation rate and deflection values based on the falling weight deflectometer test.

The database was used to calculate three criteria that express the condition of the asphalt surface, which are the probability of success of the pavement sectors against the following three defects: fatigue, roughness, and rutting, as

well as the modulus of elasticity of the pavement layers (asphalt layer, base layer, and subgrade layer) that were determined using a software package PRIMAX as input data and Regarding calculating the input parameter of "pavement surface life", it was determined by taking the difference between the deflection survey date and the date of construction or last rehabilitation date. Also, the initial pavement condition mentioned in the same study, represented by PCI values, was used as output data to train ANN models to predict PCI values.

Calculating pavement defects using the logistic model:

Non-destructive testing is an important approach for evaluating pavement structures and is widely accepted as a reliable way of determining the structural condition of existing pavements [23]. The falling weight deflectometer (FWD) is well-known for its effectiveness in determining the structural condition of pavement and assisting in defining the best treatment option possible, which reduces the deterioration of the pavement [24, 25].

The values expressing the resistance of the pavement sections to the above three pavement defects were calculated using the logistic model equations developed by the Federal Highway Administration Long-Term Performance (LTPP).

Equations 1 and 2 show the general formula, the linear formula, that were produced from the logistic model to calculate the three distress indicators of the pavement for all sectors used in building the ANN model.

Equation (1) described the general formula of the logistic model.

$$p(event)= \frac{1}{1+ e^{-b}} \quad (1)$$

Equation (2) described the calculation formula of the exponent term in the general linear.

$$b= a_0+ a_1b_1+ a_2b_2+...+ a_nb_n \quad (2)$$

where p represents the probability of an event occurring, b represents the exponent variable and (a_0, a_1, a_2 ... a_n) are the constants of the variables of the linear equation.

The variables that influence pavement fatigue to determine the value of the parameter (b) are:

– D_1 denotes the deflection measured in the loading plate's midpoint;

– AADTT;

– the base layer type.

To compute the exponential component in equation (1), we utilized the variable values generated from the logistic model for pavement fatigue cracking in Table 1.

Table 1

The coefficients values utilized in the linear equation to calculate the condition of fatigue cracking

Variables (*bi*)	a_i	
I_1	154.764	a_i = coefficient values of the equation. I_1 = The utilized deflection value's mutual index
AADTT	–0.0005073	
Pavement type	0.3774	
Constant	–0.2202	

Equation (3) is used to find the variable I_1 [26].

$$I_1= \frac{1}{D_1} \quad (3)$$

The variables that influence pavement roughness to determine the value of the parameter (b) are:

– D_2 is the measured deflection value at distance 200 mm from the center of the loading plate;

– the volume of trucks in the Class 9 classification;

– the pavement surface age from construction or from the latest maintenance.

To compute the exponential component in equation (1), we utilized the variable values generated from the logistic model for pavement roughness in Table 2.

Table 2

The coefficients values utilized in the linear equation to calculate the condition of roughness distress

Variables (*bi*)	a_i	
I_2	239.849	a_i = coefficient values of the equation. I_2 = The utilized deflection value's mutual index.
Current life	–0.189	
Class 9 volume	–0.0006781	
Constant	0.8375	

Equation (4) is used to find the variable I_2 [26].

$$I_2 = \frac{1}{D_2} \quad (4)$$

The variables that influence pavement rutting to determine the value of the parameter (*b*) are:

– D3 is the recorded deflection at a distance of 300 mm from the load plate's center;

– D4 is the deflection recorded at 450 mm from the load plate's center;

– the volume of trucks in the Class 9 classification;

– average annual precipitation in the zone area (mm).

To compute the exponential component in equation (1), we utilized the variable values generated from the logistic model for pavement rutting in Table 3.

Table 3

The coefficients values utilized in the linear equation to calculate the condition of rutting distress

Variables (*bi*)	a_i	
CI_3	–0.01146	a_i = coefficient values of the equation. CI_3 = Curvature index for the i[th] deviations values.
Precipitation (mm)	–0.0005259	
Class 9 volume	–0.0007688	
Constant	2.6586	

Equation (5) is used to find the variable CI_3 [26].

$$CI_3 = D_3 - D_4 \quad (5)$$

Initial Database for Neural Networks

The database for entry in the neural network is comprised of a set of input data and a set of output data. The input data are the measured values of the following parameters: pavement surface life, asphalt layer thickness, base layer thickness, p(fatigue), p(roughness), p(rutting), the elastic modulus of (surface layer, base layer, and subgrade layer) shown as their mean value for an individual pavement segment. The model outputs are the pavement condition index values for the pavement sections that are available in the database. The goal of this database is the preparation and sorting of data in a format appropriate for entering it into the neural network.

Application of ANN

For the objective of this study, artificial neural networks with back-propagation algorithms and different numbers of neurons (8, 9, 10, 11, 12, 13, and 14) in two hidden layers were applied using the MATLAB software. The total quantity of inspection data utilized in the construction of the ANN model was 1,614 representing 51 different sectors along the M4 highway. The data used in the training process included the minimum and maximum values of the variables to increase the efficiency of the models.

The database was divided into three groups: a large amount of database in which the neural network conducts the learning process on 70 % of the randomly selected data; the second group represents the validation process with 15 % of the database; the remaining 15 % of the data for the third group was for testing the developed network. Figure 3 shows the configuration for one of the created neural networks during training.

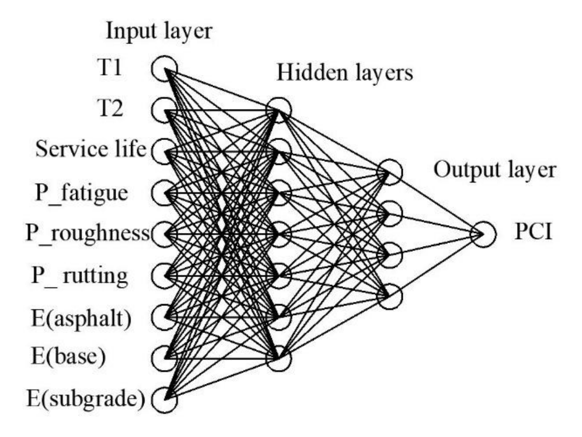


Fig. 2. The Applied ANN Model Structure

Each of the input parameters is represented by one of the nine neurons in the input layer. Eleven neurons are applied in the hidden layers, split into seven neurons in the first hidden layer and four neurons in the second layer. The output layer includes one neuron that represents the number of output data. The previous figure shows the direction of data

transmission from the input layer to the output layer through two hidden layers and vice versa to correct the error rate in the output values until the permissible limit is reached.

Several numbers of layers and neurons inside the hidden layers were applied to increase the performance of the developed network. The training procedure was repeated several times until the optimal model that accurately expressed the relationship between the input and output data was found. The effectiveness of the trained models were compared using statistical analysis of the outputs, which were represented by the mean absolute error (MAE), and coefficient of multiple correlations (R^2), Root Mean Square Error (RMSE), and mean absolute percentage deviation (MARD).

Results. After the learning step, the neural network was subjected to testing. In the testing process, weights were fixed to values adopted at the end of the learning process. A new group of input and output data was offered to the network. Network output results were compared with required output and statistically analyzed.

The following regression and performance plots illustrate the output of the network models concerning training, validation, and test sets. Throw the training process, the optimal values of the network elements were carried out after 1,000 repetitions with (MSE = 0.0224). The best validation performance of the demonstrated model was 0.0344, which was achieved after 22 repetitions for the model with structure (9–10–1), as shown in Figure 3 (*a*, *b*). The optimal values of the network elements were carried out after 1,000 repetitions with (MSE = 0.0234). The best validation performance of the demonstrated model was 0.03171, which was achieved after 11 repetitions for the model with structure (9–11–1), as shown in Figure 4 (*a*, *b*). The low value of MSE of the selected models indicates that pavement conditions of roads in the same domain may be anticipated more accurately.

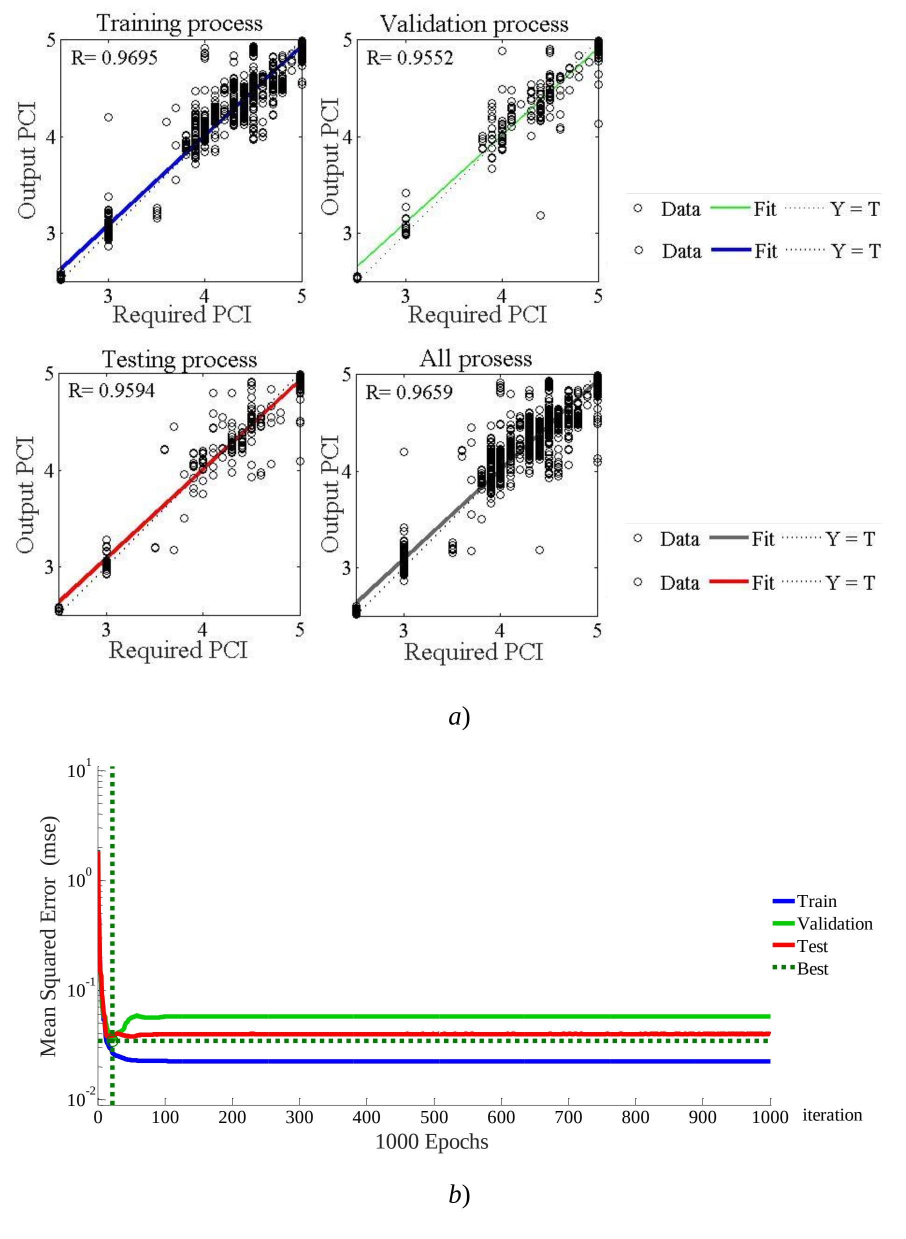


Fig. 3. Results of training an ANN model with a structure (9–10–1): *a* — regression graphs; *b* — performance chart

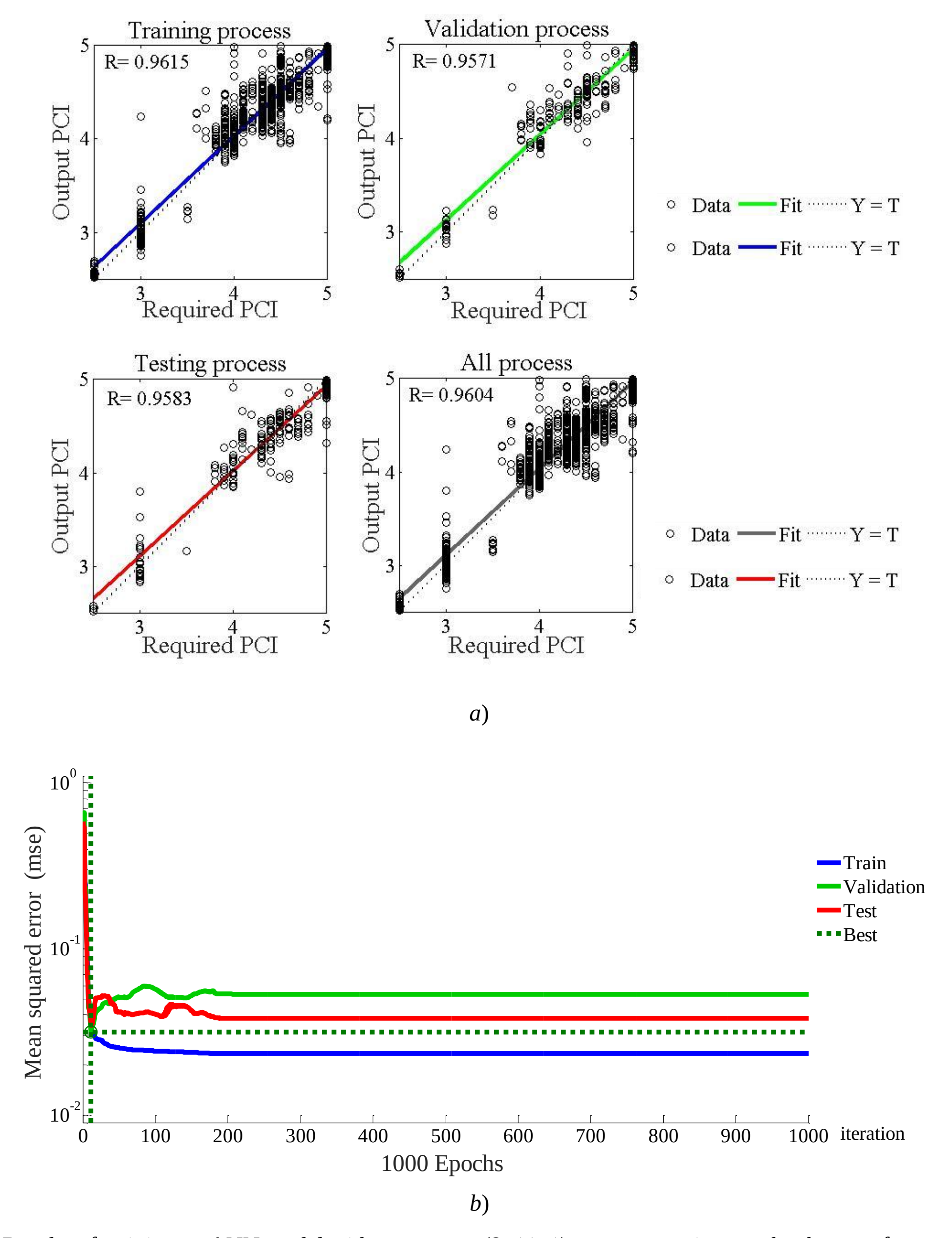


Fig. 4. Results of training an ANN model with a structure (9–11–1): *a* — regression graphs; *b* — performance chart

According to the output results, notice a high correlation coefficient between the outcomes of the neural network computation and the needed outputs. There is a significant correlation between them where most of the data falls near a 45-degree line. As shown in the previous regression charts displayed for all stages, whether training, validation or testing phases, the correlation coefficients (R) values are greater than 95% for all stages, indicating the quality of the generated models and the ability to estimate the outputs correctly.

Evaluation of Artificial Neural Network:

The created ANN model may be saved as a MATLAB file once the training procedure is completed, and the desired accuracy is achieved. We can use it to do a forward computation and forecast pavement conditions for maintenance and rehabilitation purposes.

For this purpose, a new dataset of 37 sections was assigned to asphalt pavement to evaluate the ability of the developed neural networks used in the previous section to predict the output values. In this step the models were defined by input data for the specified parameter values, which were: (asphalt layer thickness, base layer thickness, surface life, p (fatigue), p (roughness), p (rutting), E (asphalt), E (base), and E (subgrade)). As a result, the created networks were able to anticipate output data (pavement condition index- PCI) based on early experience.

The criteria for choosing the best iteration for every model were: mean absolute error (MAE), coefficient of multiple correlations (R^2), Root Mean Square Error (RMSE), and mean absolute percentage deviation (MARD) of the estimates (PCI). They ensured that the predicted values were within reasonable data limits, as shown in Table 4. Figure 6 (*a*, *b*, *c*, *d*, *e*, and *f*) presents the relationship between the prediction results of the best iteration for every model with different numbers of neurons in the hidden layers, and the target output results.

Table 4

Statistical assessment of the created models' output (forecasted results)

Statistical comparison criteria	Pavement Condition Index – PCI						
	8n	9n	10n	11n	12n	13n	14n
MAE	0.1415	0.1242	0.1185	0.1317	0.1362	0.1594	0.1190
R^2	0.9204	0.9493	0.9451	0.9365	0.9342	0.8686	0.9483
RMSE	0.2058	0.1651	0.1710	0.1840	0.1862	0.2765	0.1666
MARE	3.4478	3.0430	2.8738	3.1545	3.2909	3.9488	2.9649

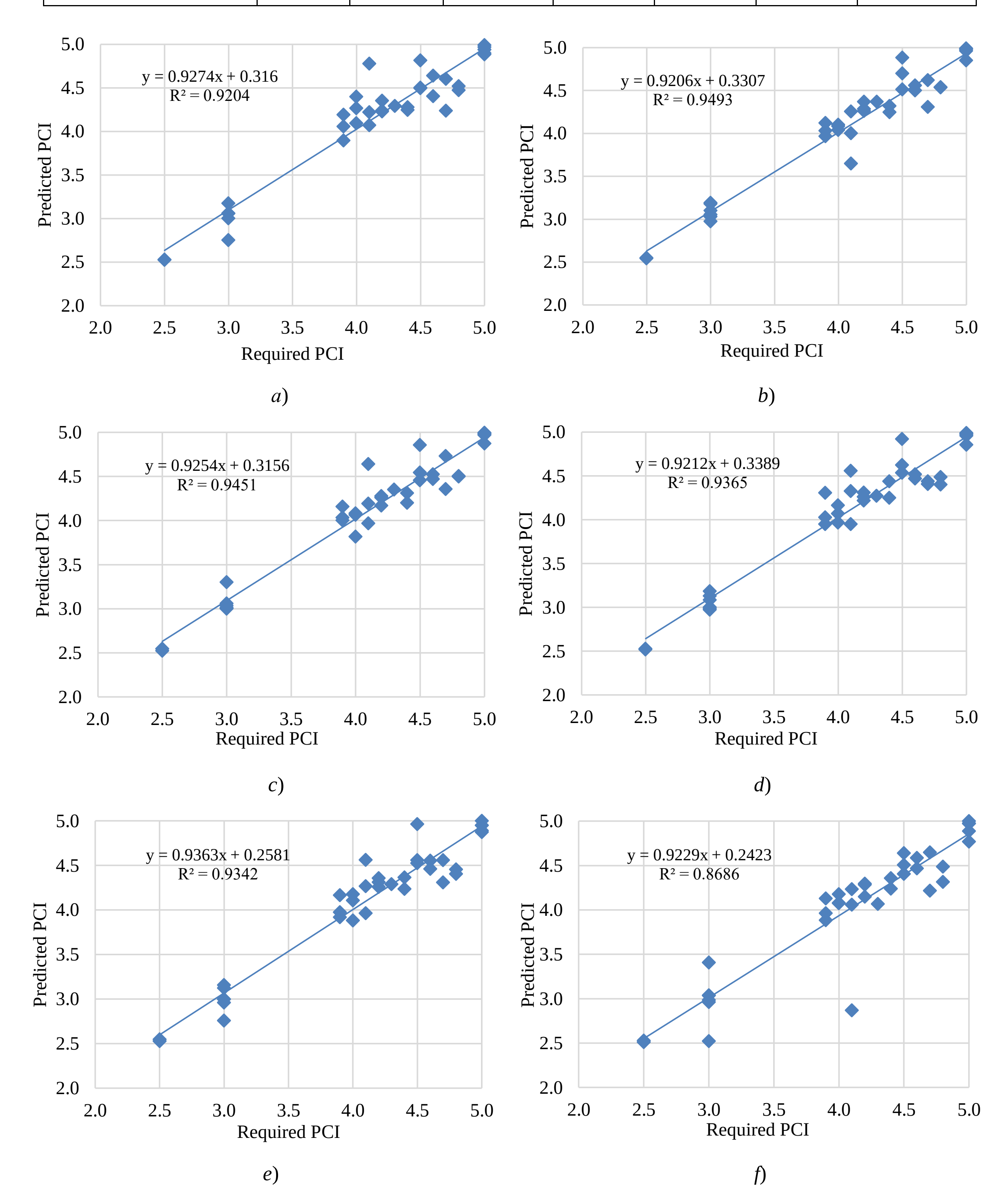
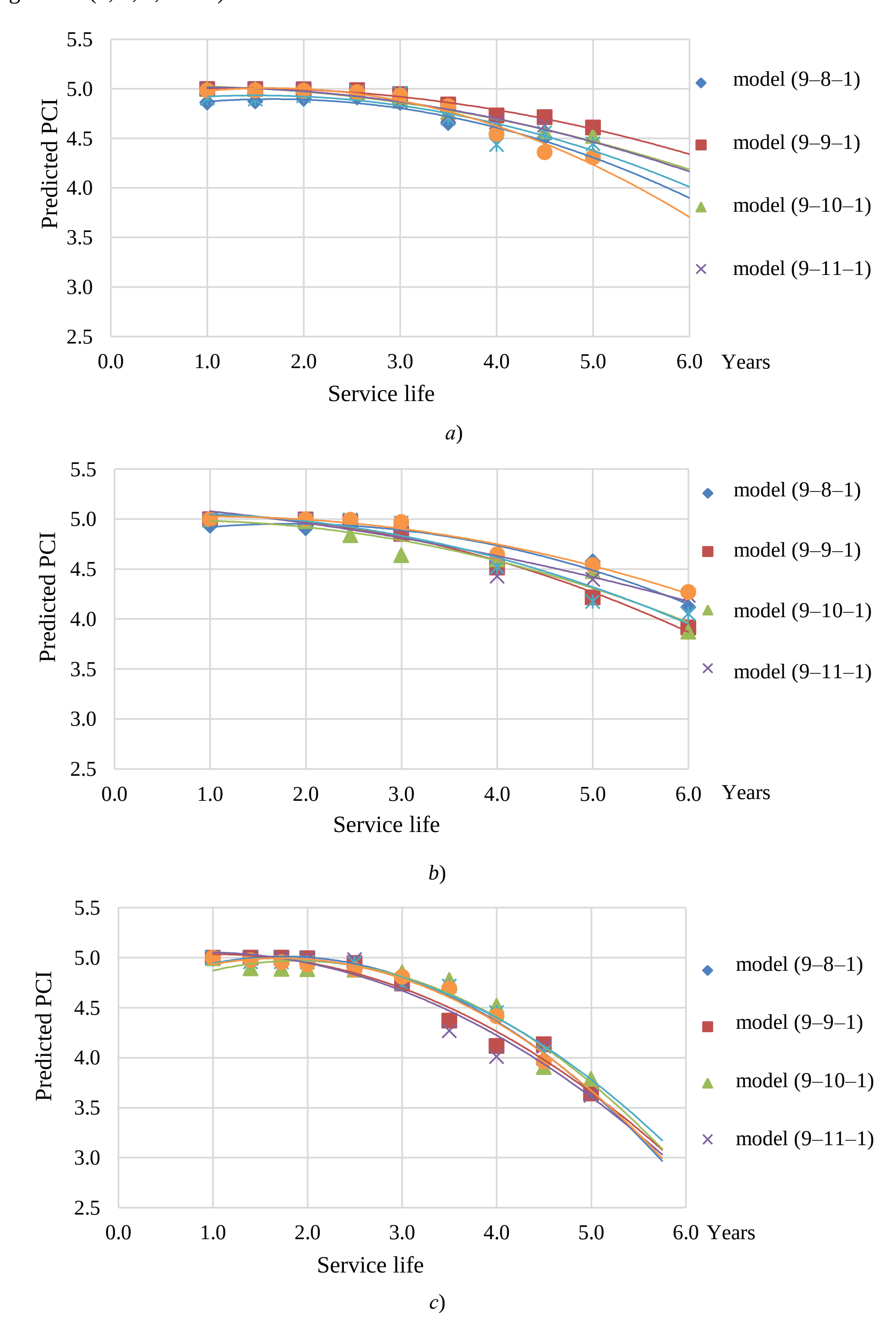


Fig. 5. Relation between actual PCI and predicted PCI for all ANN models: *a* — model with 8 neurons; *b* — model with 9 neurons; *c* — model with 10 neurons; *d* — model with 11 neurons; *e* — model with 12 neurons; *f* — model with 13 neurons

Looking at the results of the statistical analysis of the outputs of the developed models represented in Table 4 and Figure 5 (*a-f*), we find that they have an acceptable ability to predict the condition of pavement based on the variables that were used in training the models. Also, notice that the best results were for two models with the structure (9–9–1) and (9–10–1), as they had the highest coefficient of multiple correlations (R^2), which is 0.9493, 0.9451, as well as the lowest values of MAE, RMSE, and MARE.

Evaluation of pavement deterioration via ANN model:

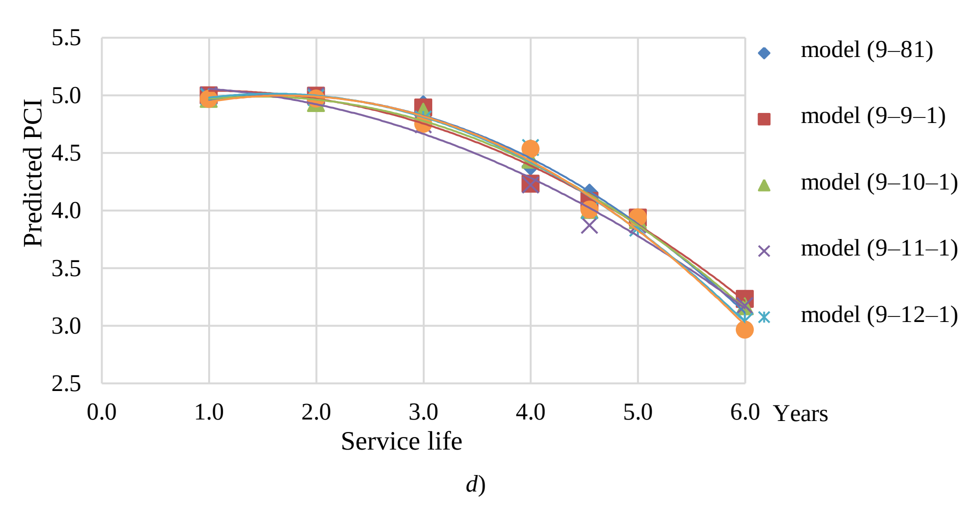
To recognize that the developed neural network models can help in predicting the rate of pavement deterioration, the idea arose to select several asphalt sectors and determine the effect of changing the operational life on the condition of each sector. To achieve this goal, each model defined the input values for each sector and fixed them, except for one variable, which was the operational life. Then we left the opportunity for the models to calculate the output values based on their previous experience. The sectors that were subjected to this experiment were numbers 504, 1227, 430, and 544, as shown in Figures. 6 (*a*, *b*, *c*, and *d*).



a)

b)

c)



d)

Fig. 6. Pavement sections deteriorations against service life: *a* — deterioration of section no. 504; *b* — deterioration of section no. 1227; *c* — deterioration of section no. 430; *d* — deterioration of section no. 544

It is clear from the previous figures that the developed models have the ability to predict the condition of the asphalt as a result of the change in the service life. Where the value of the PCI reduces as the operational life increases, which is consistent with what happens in the field.

This research may help those in charge of developing a road maintenance plan in order to limit the deterioration of the pavement condition by anticipating the pavement condition in advance and intervening promptly by choosing the appropriate treatment method in proportion to the capabilities available to the authority entrusted with this matter.

Discussion and Conclusions. To achieve the objectives of this research, artificial neural network techniques were used to construct condition data deterioration models for pavement surfaces to assist decision-makers to choose the most efficient pavement maintenance solutions. Artificial neural networks (ANN) were utilized together with back-propagation algorithms to train the forecasting models for selecting appropriate options for treatment based on the value of the pavement condition index (PCI). A wide range of 1,614 cases of pavement condition description were provided from previous investigations for various sectors of the Russian highway network to use as a database helping in creating the developed ANN models. Using MATLAB software, a large number of models with different numbers of neurons in the hidden layers were established, trained, and the results validated. The results of the models were studied, and the following conclusions were made:

– ANN models showed their ability to represent the nonlinear relationship between a large number of variables and the pavement condition coefficient with high accuracy, as indicated by the high value of the multiple correlation coefficient (R^2) for all stages of model learning (training, validation, and testing).

– According to models' validation, the variations between the actual PCI values and the predicted output results of the models were close to each other.

– Evaluation of models generated with different numbers of neurons in the hidden layers showed that they all assumed close patterns as well as similar flows of surface deterioration rates.

– The developed models save a lot of time and effort to determine the condition of the pavement and reduce the risks for the examiners compared to the visual examination method due to its dependence on the results of the dropped pregnancy test.

– The obtained results suggested that decision-makers might use the created modeling to optimize maintenance or rehabilitation methods for the most impacted roads to lower the rate of degradation based on available resources.

References

1. Schnebele E, Tanyu BF, Cervone G, et al. Review of Remote Sensing Methodologies for Pavement Management and Assessment. European Transport Research Review. 2015;7:1–19. https://doi.org/10.1007/s12544-015-0156-6

2. Jianyou Zhao, Xiaoyu Fu, Yunjiao Zhang J. Research on Risk Assessment and Safety Management of Highway Maintenance Project. Procedia Engineering. 2016;137:434–441. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.278

3. Santero NJ, Horvath A. Global Warming Potential of Pavements. Environmental Research Letters. 2009;4:034011. https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/3/034011

4. Schlegel T, Puiatti D, Ritter H-J, et al. The Limits of Partial Life Cycle Assessment Studies in Road Construction Practices: A Case Study on the Use of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2016;48:141–160. https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.005

5. Ameri M, Jarrahi A. An Executive Model for Network-Level Pavement Maintenance and Rehabilitation Planning Based on Linear Integer Programming. Journal of Industrial and Management Optimization. 2020;16:795–811. http://dx.doi.org/10.3934/jimo.2018179

6. Karleuša B, Dragičević N, Deluka-Tibljaš A. Review of Multicriteria-Analysis Methods Application in Decision Making about Transport Infrastructure. Građevinar. 2013;65:619–631. https://doi.org/10.14256/JCE.850.2013

7. Dabous SA, Zeiada W, Zayed T, et al. Sustainability-Informed Multi-Criteria Decision Support Framework for Ranking and Prioritization of Pavement Sections. Journal of Cleaner Production. 2020;244:118755. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118755

8. Setyawan A, Nainggolan J, Budiarto A. Predicting the Remaining Service Life of Road Using Pavement Condition Index. Procedia Engineering. 2015;125:417–423. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.108

9. Chengjia Han, Tao Ma, Guangji Xu, et al. Intelligent Decision Model of Road Maintenance Based on Improved Weight Random Forest Algorithm. International Journal of Pavement Engineering. — 2022. — Vol. 23. — P. 985–997. https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1784418

10. Abiodun OI, Jantan A, Omolara AE, et al. State-of-the-Art in Artificial Neural Network Applications: A Survey. Heliyon. 2018;4:e00938. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00938

11. Kumar R, Suman SK, Prakash G. Evaluation of Pavement Condition Index Using Artificial Neural Network Approach. Transportation in Developing Economies. 2021;7:1–15. https://doi.org/10.1007/s40890-021-00130-7

12. Hamdi, Hadiwardoyo SP, Correia AG, et al. Prediction of Surface Distress Using Neural Networks. AIP Conference Proceedings. 2017;1855:040006. https://doi.org/10.1063/1.4985502

13. Thube DT. Artificial Neural Network (ANN) Based Pavement Deterioration Models for Low Volume Roads in India. International Journal of Pavement Research and Technology. 2012;5:115–120.

14. Lingyi Yao, Qiao Dong, Jiwang Jiang, et al. Establishment of Prediction Models of Asphalt Pavement Performance Based on a Novel Data Calibration Method and Neural Network. Transportation Research Record. 2019;2673:66–82. https://doi.org/10.1177/0361198118822501

15. Shtayat A, Moridpour S, Best B, et al. An Overview of Pavement Degradation Prediction Models. Journal of Advanced Transportation. 2022;2022:7783588. https://doi.org/10.1155/2022/7783588

16. Mazari M, Rodriguez DD. Prediction of Pavement Roughness Using a Hybrid Gene Expression Programming-Neural Network Technique. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 2016;3:448–455. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.09.007

17. Mosa AM. Neural Network for Flexible Pavement Maintenance and Rehabilitation. Applied Research Journal. 2017;3:114–129.

18. Ceylan H, Gopalakrishnan K, Bayrak MB. Neural Networks Based Concrete Airfield Pavement Layer Moduli Backcalculation. Civil Engineering and Environmental Systems. 2008;25:185–199. https://doi.org/10.1080/10286600701838667

19. Elshamy MM, Tiraturyan AN, Uglova EV, et al. Comparison of Feed-forward, Cascade-forward, and Elman Algorithms Models for Determination of the Elastic Modulus of Pavement Layers. In: Proc. 2021 4th International Conference on Geoinformatics and Data Analysis. 2021. P. 46–53. https://doi.org/10.1145/3465222.3465235

20. Ceylan H, Gopalakrishnan K, Bayrak MB, et al. Noise-Tolerant Inverse Analysis Models for Nondestructive Evaluation of Transportation Infrastructure Systems Using Neural Networks. Nondestructive Testing and Evaluation. 2013;28:233–251. https://doi.org/10.1080/10589759.2012.742084

21. Issa A, Samaneh H, Ghanim M. Predicting Pavement Condition Index Using Artificial Neural Networks Approach. Ain Shams Engineering Journal. 2022;13:101490. https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.04.033

22. Taher KA, Jisan BMY, Rahman MM. Network Intrusion Detection Using Supervised Machine Learning Technique with Feature Selection. In: Proc. 2019 International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST) – IEEE. 2019. P. 643–646. https://doi.org/10.1109/ICREST.2019.8644161

23. García JAR, Castro M. Analysis of the Temperature Influence on Flexible Pavement Deflection. Construction and Building Materials. 2011;25:3530–3539. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.046

24. Donovan P, Tutumluer E. Falling Weight Deflectometer Testing to Determine Relative Damage in Asphalt Pavement Unbound Aggregate Layers. Transportation Research Record. 2009;2104:12–23. http://dx.doi.org/10.3141/2104-02

25. Elshamy MMM, Tiraturyan AN, Uglova EV, et al. Development of the Non-destructive Monitoring Methods of the Pavement Conditions via Artificial Neural Networks. Journal of Physics: Conference Series. 2020;1614:012099. https://doi:10.1088/1742-6596/1614/1/012099

26. Stubstad R, Carvalho R, Briggs R, et al. Simplified Techniques for Evaluation and Interpretation of Pavement Deflections for Network-Level Analysis: Guide for Assessment of Pavement Structure Performance for PMS

Applications. Turner-Fairbank Highway Research Center; 2012. P. 34. — URL: https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltpp/12025/12025.pdf

Received 09.08.2022
Revised 29.08.2022
Accepted 39.08.2022

About the Authors:

Mohamed Mostafa Mahmoud Elshamy, PhD student of the Motorways Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), assistant lecturer at Faculty of Engineering, Al-Azhar University (1, Al Mokhaym Al Daem St., Cairo, Nasr-City, 11884, Arab Republic of Egypt), ScopusID, ORCID, mm.elshamy85@gmail.com

Tiraturyan, Artem N., associate professor of the Motorways Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Dr.Sci. (Eng.), associate professor, ScopusID, ResearcherID, ORCID, tiraturjan@list.ru

Uglova, **Evgeniya V.,** associate professor of the Motorways Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Dr.Sci. (Eng.), professor, ScopusID, ResearcherID, ORCID, uglova.ev@yandex.ru

Mohamed Zakaria Elgendy, lecturer at the Faculty of Engineering, Al-Azhar University (1, Al Mokhaym Al Daem St., Cairo, Nasr-City, 11884, Arab Republic of Egypt), ScopusID, ORCID, mohamedelgendy@azhar.edu.eg

Claimed contributorship:

M. M. M Elshamy: preparation of the text; preparation of the results and graphs; formulation of conclusions. A. N. Tiraturyan: a review of literature sources, calculations, computational analysis, analysis of the research results. E. V. Uglova: basic concept formulation; formulation of the research objective and tasks; academic advising; text processing; correction of the conclusions. M. Z. Elgendy: the text revision; discussion of the results.

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Об авторах:

Мохамед Мостафа Махмуд Елшами, аспирант кафедры «Автомобильные дороги» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ассистент на инженерном факультете Университета Аль-Азхар (Арабская Республика Египет, г. Каир, Наср-Сити, ул. Аль-Мохайм Аль-Даем, 1), ScopusID, ORCID, mm.elshamy85@gmail.com

Тиратурян Артём Николаевич, доцент кафедры «Автомобильные дороги» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, доцент, ScopusID, ResearcherID, ORCID, tiraturjan@list.ru

Углова Евгения Владимировна, доцент кафедры «Автомобильные дороги» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ScopusID, ResearcherID, ORCID, uglova.ev@yandex.ru

Мохамед Закария Елгенди, преподаватель на инженерном факультете Университета Аль-Азхар (Арабская Республика Египет, г. Каир, Наср-Сити, ул. Аль-Мохайм Аль-Даем, 1), ORCID, mohamedelgendy@azhar.edu.eg

Заявленный вклад соавторов

М. М. М. Елшами — подготовка текста; подготовка результатов и графиков; формулирование выводов. А. Н. Тиратурян — обзор литературных источников, проведение расчетов, анализ результатов исследования. Е. В Углова: научное руководство, формулирование основной концепции; постановка цели и задач исследования, доработка текста; корректировка выводов. М. З. Елгенди — доработка текста, обсуждение результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT





УДК 004.032.26, 531.3:625.7
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-285-292

Научная статья



Решение задачи определения механических свойств материалов дорожных конструкций с использованием нейросетевых технологий



Н. Е. Бабушкина✉, **А. А. Ляпин**
Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ copybird@yandex.ru

Аннотация

Введение. Определение механических свойств слоистых конструкций автомобильных дорог является актуальной задачей. Это обусловлено, во-первых, необходимостью контроля качества новых участков при строительстве автомагистралей. Во-вторых, представляет интерес оценка состояния действующих дорог при накоплении повреждений и дефектов. Образование множественных дефектов (трещин) меняет осредненные вязкоупругие свойства составляющих конструкции, особенно поверхностных асфальтобетонных слоев. В статье рассматривается использование нейросетевых технологий для повышения точности восстановления вязкоупругих свойств. Данный подход базируется на экспериментальных методах. В качестве примера можно привести определение динамического прогиба конструкции от падения груза (англ. determining the dynamic deflection of a structure from a falling weight, FWD).

Материалы и методы. На основе нейронной сети определены модули упругости трехслойной конструкции. Для выяснения точности решения его сопоставили с результатами математического моделирования и экспериментальными данными.

Результаты исследования. Экспериментальные и расчетные показатели модулей упругости отдельных слоев дорожной конструкции оказались очень близкими. Предложенный подход к определению механических свойств материалов дорожных конструкций позволяет применить полученные результаты для определения состояния отдельных элементов и всей дорожной конструкции.

Обсуждение и заключения. Показана перспективность использования искусственного интеллекта для определения механических свойств слоистых конструкций. Дальнейшее совершенствование методов и средств анализа поведения дорожной конструкции при динамическом нагружении позволит расширить существующие подходы к оценке состояния дорожных конструкций.

Ключевые слова: нейронная сеть, неразрушающий контроль, модуль упругости, регрессионный анализ, многослойная сеть, ударное вдавливание, нейросетевые технологии.

Благодарности. Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку исследования.

Финансирование. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22–29–01259, https://rscf.ru/project/22-29-01259/

Для цитирования. Бабушкина, Н. Е. Решение задачи определения механических свойств материалов дорожных конструкций с использованием нейросетевых технологий / Н. Е. Бабушкина, А. А. Ляпин // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 3. — С. 285–292. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-285-292

Original article

Solving the Problem of Determining the Mechanical Properties of Road Structure Materials Using Neural Network Technologies

Natalia E. Babushkina, **Alexandr A. Lyapin**
Don State Technical University, 1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, Russian Federation
copybird@yandex.ru

Abstract
Introduction. Determination of mechanical properties of layered structures of highways is an urgent task. This is due, firstly, to the need to control the quality of new sections during the construction of highways. Secondly, to assess the condition of existing roads with the accumulation of damage and defects is of interest. The formation of multiple defects (cracks) changes the averaged viscoelastic properties of the components of the structure, specifically, the surface asphalt-concrete layers. The article discusses the use of neural network technologies to improve the accuracy of the recovery of viscoelastic properties. This approach is based on experimental methods. As an example, we can give the definition of the dynamic deflection of a structure from a falling weight, FWD.
Materials and Methods. The elastic modulus of a three-layer structure was determined on the basis of a neural network. To find out the solution accuracy, it was compared to the results of mathematical modeling and experimental data.
Results. The experimental and calculated parameters of the elastic modulus of individual layers of the road structure turned out to be very close. The proposed approach to determining the mechanical properties of materials of road structures allowed us to apply the obtained results to examination of the condition of individual elements and the entire road structure.
Discussion and Conclusions. The prospects of using artificial intelligence to determine the mechanical properties of layered structures was shown. Further improvement of methods and tools for analyzing the behavior of road structures under dynamic loading will expand existing approaches to assessing the condition of road structures.

Keywords: neural network, non-destructive testing, modulus of elasticity, regression analysis, multilayer network, impact indentation, neural network technologies.

Acknowledgments. The authors express their gratitude for the financial support of the research.

Funding information. The work was done on RFFI grant no. 22–29–01259, https://rscf.ru/project/22-29-01259/

For citation. N. E. Babushkina, A. A. Lyapin. Solving the Problem of Determining the Mechanical Properties of Road Structure Materials Using Neural Network Technologies. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 285–292. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-285-292

Введение. Оценка состояния дорожных конструкций позволяет прогнозировать процесс эксплуатации дорог, планировать сроки и объемы ремонтно-восстановительных мероприятий, влиять на эффективность и безопасность работы автомобильного транспорта. Активно задействуются методы неразрушающего контроля[1]. В ряде научных работ [1, 2] авторы отметили надежность и экономичность такого подхода. К неразрушающим относится определение динамического прогиба конструкции от падения груза (метод ударного нагружения, FWD, от англ. determining the dynamic deflection of a structure from a falling weight). Данный подход предполагает регистрацию чаш прогиба поверхности дорожной конструкции на определенном расстоянии от точки приложения ударного воздействия. При этом в ходе работы установки рассчитываются модули упругости слоев, определяются нагрузка и толщина слоев конструкции.

Одна из основных целей научных изысканий в этом направлении — обеспечить своевременное обнаружение дефектов и изменений в компонентах дорожных конструкций. Исследователи установили фактор, сильнее других влияющий на главные характеристики динамического напряженно-деформированного состояния системы «дорожная конструкция — грунт». Это изменение динамических модулей упругости элементов дорожного покрытия, основания и грунта [3–5][2].

[1] Еремин Р. А., Кулижников А. М., Пудова Н. Г. Методика комплексного обследования дорожной одежды автомобильных дорог с применением методов неразрушающего контроля // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации : мат-лы 16-й общерос. науч.-практ. конф. изыскательских организаций / ООО «Геомаркетинг», ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве», Ассоциация «Инженерные изыскания в строительстве», Общероссийское отраслевое объединение работодателей Союз изыскателей. М. : Геомаркетинг, 2021. С. 438–446.
[2] Qinwu, X. Development of a Computational Method for Inverting Dynamic Moduli of Multilayer Systems with Applications to Flexible Pavements under FWD Tests : dis. … doc. of philos. Texas, 2014. 223 p.

Альтернативным инструментом для контроля состояния дорожных покрытий может быть нейронная сеть, обученная по результатам экспериментов [6, 7]. Стоит отметить широкое применение нейронных сетей в области строительства, в том числе дорожного. Нейронные сети — эффективное средство для решения некоторых задач классификации, в том числе строительных. С их помощью можно выполнить и регрессионный анализ. Традиционный подход к построению нелинейных моделей имеет ряд ограничений. Они связаны, во-первых, со сложными, скрытыми нелинейными связями исходных данных. Во-вторых, с течением времени возможна модификация структуры связей, что обусловливает необходимость трансформации структуры нелинейной модели. Использование нейросетевых технологий позволяет устранить недостатки традиционного подхода. Нейронная сеть способна самостоятельно определять функциональные зависимости, с заданной точностью аппроксимировать нелинейные функции, перестраивать свою архитектуру в процессе обучения. Вышеизложенное подтверждает актуальность представленной работы.

Нейросетевые технологии открывают новые возможности для решения задач проектирования, оптимизации и диагностики строительных конструкций [8–11]. О. М. Максимова пишет, что возможности дообучения нейронной сети позволяют совершенствовать строительную конструкцию, улучшать ее управление [12]. В [13] отмечается, что искусственный интеллект может снизить издержки компаний, благодаря своевременной диагностике строительных объектов. В [14] представлен широкий обзор возможностей применения нейронных сетей в строительстве. Автор отмечает многовариантность использования искусственного интеллекта для решения множества сложных нелинейных задач прогнозирования, оценки, оптимизации.

В [15] особое внимание уделяется качеству и состоянию дорожной сети. На основе экспериментальных данных сравниваются две модели: многомерный анализ и искусственная нейронная сеть. Их разработали для создания системы поддержки принятия решений при оценке эксплуатационного состояния дорог в связи с гидрогеологической обстановкой. Автор делает вывод о большей надежности и эффективности нейросетевой модели.

Отдельно стоит сказать о выборе типа нейронной сети. Авторы [16] приходят к выводу, что тип нейронной сети существенно не влияет на решение задачи расчета модуля упругости слоев дорожного покрытия. При этом наиболее схожие результаты между моделью и целевыми значениями обеспечила модель нейронной сети с прямой связью.

Цель исследования — решение задачи обратного расчета модулей упругости по чашам динамических прогибов от ударного воздействия установкой FWD. Сравниваются результаты:

– моделирования динамического воздействия на дорожную конструкцию;

– полученные нейронной сетью.

Материалы и методы. С помощью программы расчета волновых полей в конструкции смоделировано динамическое воздействие от установки FWD. Используемую при расчете модель осесимметричной деформации среды аналитически можно описать как многослойное полупространство D, состоящее из N слоев в цилиндрической системе координат (R, θ, Z). Ось симметрии OZ направлена вертикально вверх и ортогональна граничной плоскости полупространства и его слоев (рис. 1).

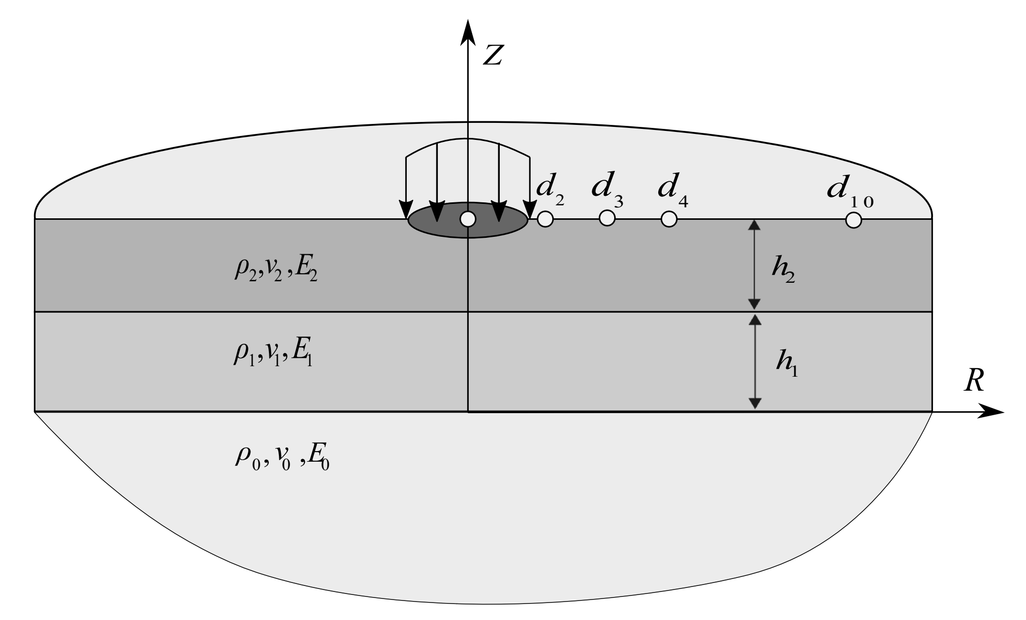


Рис. 1. Многослойная конструкция дорожной одежды в продольном разрезе

Движения среды описываются динамическими уравнениями Ламе в перемещениях для однородного линейно-упругого материала в пределах каждого слоя:

$$(\lambda + 2\mu)\,\mathrm{grad}\,\mathrm{div}\,u(r,t) - \mu\,\mathrm{rot}\,\mathrm{rot}\,u(r,t) = \rho\ddot{u}(r,t)\,, \quad (1)$$

где $u = (u_R,\ u_Z)$ — вектор перемещений, r — радиус-вектор точки наблюдения, λ, μ — упругие коэффициенты Ламе, ρ — плотность материала.

Слои полупространства D жестко скреплены между собой. При переходе через плоские границы раздела требуется совпадение векторов перемещений и напряжений (σ_z, τ_{zr}).

Каждый слой полупространства обладает следующими характеристиками: толщина h_i, плотность ρ_i, модуль упругости $E_i = \mu_i \frac{3\lambda_i+2\mu_i}{\lambda_i+\mu_i}$, коэффициент Пуассона $\nu_i = \frac{0{,}5\,\lambda_i}{\lambda_i+\mu_i}$.

Граничные условия для вектора напряжений $s = (\sigma_z, \tau_{zr})$ на верхней границе многослойной среды D, распределенного по пятну радиуса r_0 контакта колеса и дорожной конструкции, можно записать:

$$\sigma_z(R,t) = \begin{cases} P_0 sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right), t \in [0,\tau] \\ 0, t > \tau \end{cases}, \tau_{zr} = 0, \quad (2)$$

где P_0 — постоянная интенсивность ударного нагружения длительностью τ.

Для решения задачи используется интегральное преобразование Ханкеля по радиальной координате Фурье и по времени. В результате получено представление волнового поля:

$$u(r,t) = \int_0^\infty d\omega exp(-i\omega t) \int_0^\infty Q(u,\omega)\cdot S(u,\omega) J_{0,1}(uR)udu. \quad (3)$$

Здесь $S(u,\omega)$ — преобразование Фурье — Ханкеля от вектора внешней нагрузки s; $Q(u,\omega)$ — матрица-функция Грина для многослойного полупространства, полученная с использованием принципа суперпозиции в виде суммы матриц для однородного полупространства, как в [4].

Для анализа свойств конструкции при решении обратной задачи используются результаты экспериментальных измерений чаши динамических прогибов в заданных точках наблюдения на поверхности $R = d_k$, $k = 1, 2, ..., 10$. Среднее расстояние между ними — 0,3 м. Измеряемая характеристика в каждой точке на поверхности:

$$\max_t |u_z(d_k,t)|.$$

На рис. 2 — пример поведения функций вертикальных прогибов по времени для типовой трехслойной конструкции автодороги.

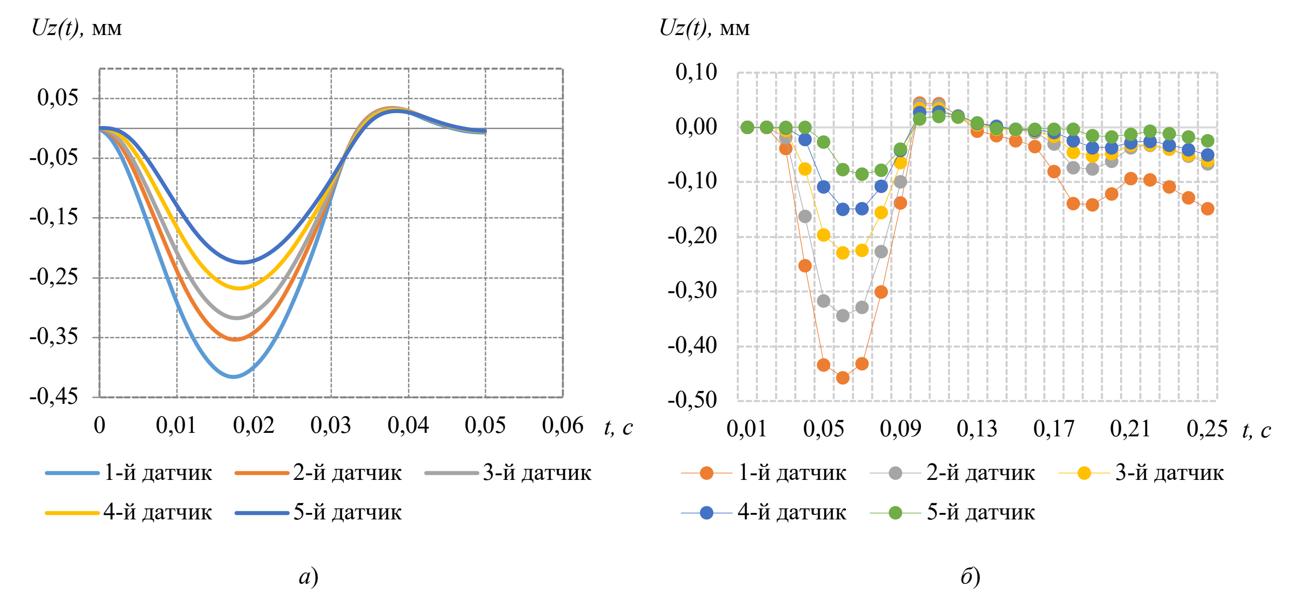


Рис. 2. Временные зависимости вертикальных прогибов $u_z(d_k,t)$: *а* — данные моделирования; *б* — данные эксперимента

Процедура восстановления модулей упругости конструкции E_i основывается на минимизации квадратичной функции ошибки:

$$F(E_i) = \sum_{k=1}^{10}\left(\xi_k(E_i) - \xi_k^{exp}\right)^2,$$

где ξ_k^{exp} получены из эксперимента с использованием установки FWD. В качестве алгоритма минимизации выбрали метод Левенберга — Марквардта. Элементы градиента и матрицы Гессе функции F вычисляются

конечными разностями 1-го порядка. При этом контролируется выход модулей упругости E_i за рамки физических диапазонов изменения этих параметров.

Для решения задачи с помощью нейронных сетей рассмотрена типовая конструкция дорожной одежды (таблица 1).

Таблица 1

Конструкция дорожной одежды эксперимента

Конструктивные элементы	Толщина, см	Границы модуля упругости, МПа	
		верхняя	нижняя
Асфальтобетонный слой	10	4200	1200
Щебеночный слой	44	1500	100
Грунт	∞	300	20

В таблице 1 представлены основные конструктивные элементы исследуемого участка дороги. Отметим, что модель построена с максимальным показателем модуля упругости (4200 МПа), так как экспериментальные результаты измерений привязаны к средней температуре воздуха 20 °C. Для определения модулей упругости в зимний период необходим перерасчет показателей.

Полносвязную нейронную сеть реализовали на языке Python с использованием библиотеки глубокого обучения Keras. Основные параметры сети:

– 300, 30, 3 нейронов в слоях;

– 3000 эпох обучения.

Функция активации в скрытых слоях — ReLu, в выходном слое — sigmoid. Сеть работает с нормированными данными в диапазоне от 0 до 1. После вычислений сети производится денормализация в числовой вид. Нейронная сеть обучалась на полученном при моделировании наборе данных из 1000 значений. В среднем погрешность вычислений нейросети на тестовом множестве находится в пределах 10 %.

Входы нейронной сети — чаши динамических прогибов. На рис. 3 они показаны при различных модулях упругости слоев дорожной конструкции. Выходы сети — значения модулей упругости конструктивных элементов дорожной одежды.

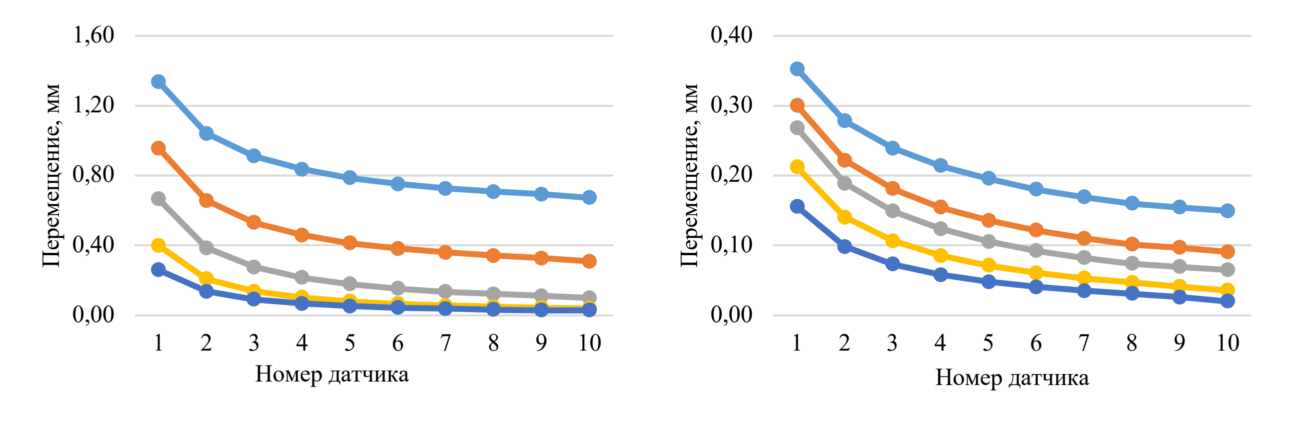


Рис. 3. Чаши динамических прогибов при различных модулях упругости

Экспериментальные данные для исследования получили с помощью установки FWD на участке дороги с толщиной асфальтобетонного покрытия 10 см и толщиной щебеночного слоя 44 см. Определены модули упругости слоев дорожных одежд (таблица 1). Схема размещения датчиков-геофонов: 0 — 20 — 30 — 45 — 60 — 90 — 120 — 150 — 180 — 210 см от точки ударного воздействия.

Результаты исследования. Авторы рассмотрели различные варианты сочетания конструктивных элементов:

– асфальтобетонный + щебеночный слой;

– асфальтобетонный слой + грунт;

– щебеночный слой + грунт;

– асфальтобетонный + щебеночный слой + грунт.

Рассмотрим визуализации итогов вычислений нейронной сети. На рис. 4 изображены результаты, полученные нейронной сетью при тестовом расчете для 1-го варианта. Точность вычислений превысила 90 %.

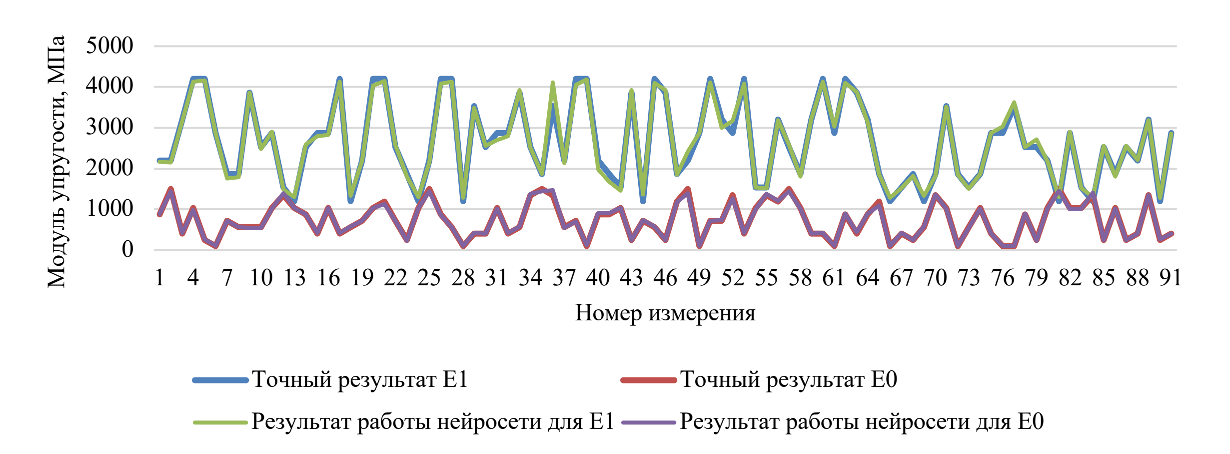


Рис. 4. Результат обучения нейронной сети при варианте 1 — «асфальтобетонный + щебеночный слой»

Что касается тестовых расчетов для вариантов 2 и 3, то в целом результаты вычислений близки к 1-му. На рис. 5 виден хороший результат обучения нейронной сети на всех слоях конструкции. Представленные значения получены на тестовом множестве случайной выборкой.

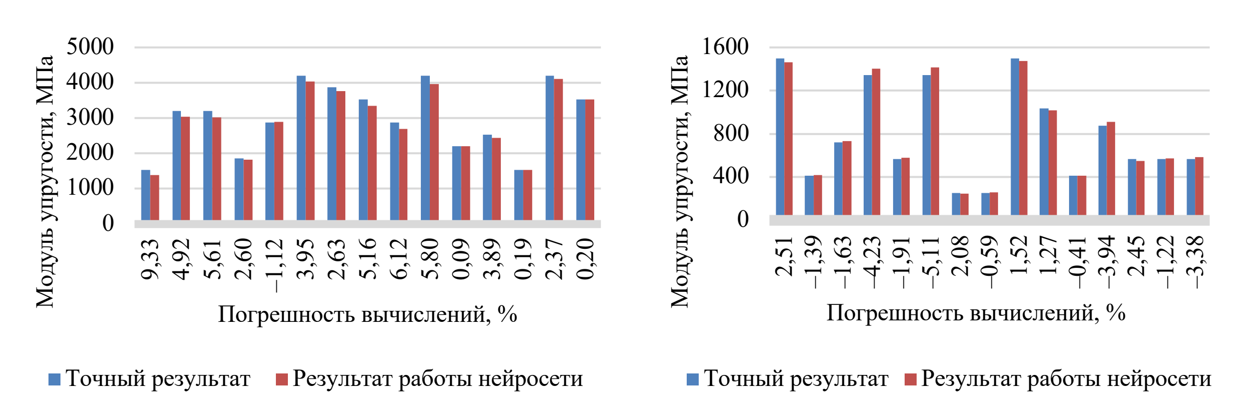


Рис. 5. Погрешность вычислений нейронной сети при варианте (1)

Графическое представление соотношения ожидаемого и полученного результата величины модуля упругости на рис. 5 свидетельствует о несущественных погрешностях при тестовом расчете слоев дорожной конструкции для случая 1.

Особое внимание стоит уделить тестовому расчету для варианта 4.

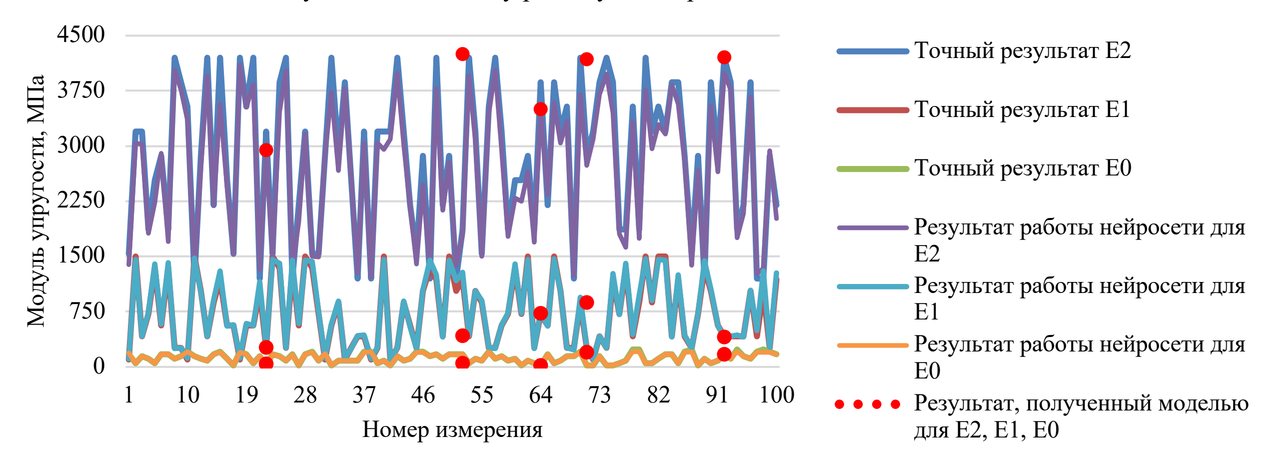
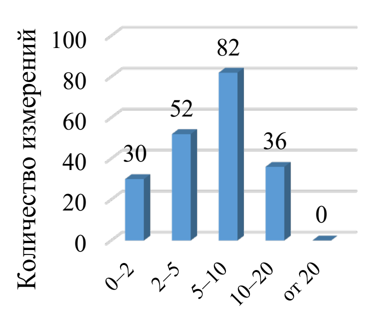
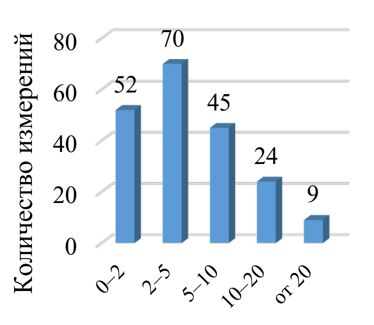


Рис. 6. Результат обучения нейронной сети при варианте 4 — «асфальтобетонный + щебеночный слой + грунт»

На рис. 7 представлено статистическое распределение погрешности вычислений нейросети. Отметим, что средняя погрешность большинства измерений — около 10 %. Однако в некоторых случаях наблюдается максимальное отклонение, близкое к 23 % (на гистограмме это группа 20 % и более).





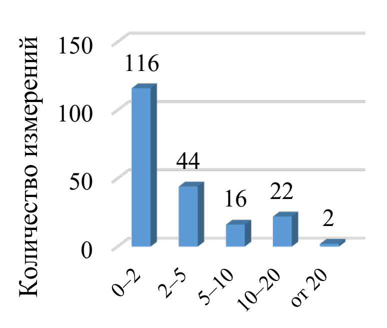


Рис. 7. Погрешность вычислений нейронной сети при варианте 4 — «асфальтобетонный + щебеночный слой + грунт»:
а — при $E_2 \in [1200, 4200]$ МПа; *б* — при $E_1 \in [100, 1500]$ МПа; *в* — при $E_0 \in [20, 300]$ МПа

Из данных рис. 7 можно сделать выводы о точности вычислений нейронной сети на тестовом множестве. В первом случае (рис. 7 *а*) отмечаем, что из всего проверочного множества 41 % (82 измерения) имеют погрешность в пределах 5–10 %. Аналогичные показатели 52 измерений (26 %) — 2–5 %. В 30 случаях (15 %) зафиксированы значения 0–2 %. 36 измерений (18 %) дали результаты 10–20 %.

На рис. 7 *б* максимальный показатель — 70 значений для погрешностей 2–5 %. Согласно рис. 7*в* результаты вычислений модулей упругости грунта имеют наименьшую погрешность. Так, в пределах 0–2 % находится 116 значений. Это 58 % от тестового множества. 44 и 16 значений находятся в пределах 10 % погрешности (22 % и 8 % соответственно).

Обсуждение и заключения. Таким образом, нейросетевые технологии показали себя эффективным инструментом для определения механических свойств материалов дорожных конструкций. При решении обратной задачи отмечается высокая степень восстановления значений модулей упругости. Средняя погрешность вычислений не превышает 10 %.

Рассмотрены варианты обучения нейронной сети согласно значениям модулей упругости слоев. Зафиксированная в этих случаях погрешность связана в основном с недостаточным обучением сети. Для решения проблемы необходимо увеличивать количество данных для обучения.

Результаты применения нейросетевой технологии согласуются с экспериментальными данными, полученными после работы установки динамического нагружения FWD.

Список литературы

1. Федосов, А. В. Методы неразрушающего контроля / А. В. Федосов, Л. А. Гайнуллина // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2015. — Т. 11. — С. 73–78.

2. Kychkin, V. I. Not Destroying Dynamic Quality Monitoring of Road Clothes / V. I. Kychkin, V. S. Jushkov // Naukovedenie. — 2013. — Vol. 14. — P. 34.

3. Углова, Е. В. Оценка модулей упругости слоев дорожной одежды на стадии эксплуатации автомобильных дорог / Е. В. Углова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2009. — № 2. — С. 170–178.

4. Углова, Е. В. Комплексный подход к исследованию характеристик динамического деформирования на поверхности нежестких дорожных одежд с использованием методов неразрушающего контроля / Е. В. Углова, А. Н. Тиратурян, А. А. Ляпин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2016. — № 2. — С. 111–130. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.2.08

5. Тиратурян, А. Н. Оценка деградации прочности нежестких дорожных конструкций на основе натурных измерений на участке автомобильной дороги М-4 «Дон» в п. Тарасовский / А. Н. Тиратурян, С. А. Ольховой // Инженерный вестник Дона. — 2017. — № 2. — С. 122.

6. Babushkina, N. Analysis of Neural Network Results Based on Experimental Data during Indentation / N. Babushkina, A. Lyapin, A. Kovaleva // E3S Web of Conferences. — 2020. — Vol. 224. — P. 01018. http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202022401018

7. Babushkina, N. Solving the Problem of Classification of Material Properties Using a Neural Network / N. Babushkina, A. Lyapin // Journal of Physics Conference Series. — 2021. — Vol. 2131. — P. 032084. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032084

8. Kulkarni, P.S. Artificial Neural Networks for Construction Management: A Review / P.S. Kulkarni, S. N. Londhe, M. C. Deo // Journal of Soft Computing in Civil Engineering. — 2017. — Vol. 1/2. — P. 70–88. HTTPS://dx.doi.org/10.22115/scce.2017.49580

9. Батурина, Н. Ю. Нейросетевые модели в задачах исследования строительных конструкций / Н. Ю. Батурина // Инженерный вестник Дона. — 2013. — № 4. — С. 201.

10. Elfaki, A. O. Using Intelligent Techniques in Construction Project Cost Estimation: 10-Year Survey / A. O. Elfaki, S. Alatawi, E. Abushandi // Advances in Civil Engineering. — 2014. — Art. 107926. https://doi.org/10.1155/2014/107926

11. Patel, D. A. Evaluation of Construction Projects Based on the Safe Work Behavior of Co-employees through a Neural Network Model / D. A. Patel, K. N. Jha // Safety Science. — 2016. — Vol. 89. — P. 240–248. https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2016.06.020

12. Максимова, О. М. Развитие и применение нейросетевых технологий для задач механики и строительных конструкций / О. М. Максимова // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2013. — № 8. — С. 81–89.

13. Газаров, А. Р. Преимущества использования искусственного интеллекта в сфере строительства / А. Р. Газаров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2020. — № 4. — С. 136–139.

14. Waziri, B. S. Artificial Neural Networks in Construction Engineering and Management / B. Sh. Waziri, K. Bala, Sh. A. Bustani // International Association for Sustainable Development and Management (IASDM). — 2017. — Vol. 6. — P. 50–60. http://dx.doi.org/10.7492/IJAEC.2017.006

15. Dell'Acqua, G. Using Artificial Neural Network and Multivariate Analysis Techniques to Evaluate Road Operating Conditions / G. Dell'Acqua, M. De Luca, D. Zilioniene / Journal of Risk Research. — 2018. — Vol. 21. — P. 679–691. https://doi.org/10.1080/13669877.2016.1264445

16. Elshamy, M. M. M. Evaluation of the Elastic Modulus of Pavement Layers Using Different Types of Neural Networks Models / M. M. M. Elshamy, A. N. Tiraturyan, E. V. Uglova // Advanced Engineering Research. — 2021. — Vol. 21. — P. 364–375. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-364-375

Поступила в редакцию 20.04.2022
Поступила после рецензирования 16.06.2022
Принята к публикации 16.06.2022

Об авторах:

Бабушкина Наталья Евгеньевна, аспирант кафедры «Информационные системы в строительстве» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, ORCID, copybird@yandex.ru

Ляпин Александр Александрович, заведующий кафедрой «Информационные системы в строительстве» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор физико-математических наук, профессор, ScopusID, ORCID, lyapin.rnd@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Н. Е. Бабушкина — формулирование концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, выводы. А. А. Ляпин — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.